

Neuartiges Verfahren zur
Online-Prozessüberwachung und
-Fehlerklassifizierung beim
Durchsetzfügeverbinden von Blechen

Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von

M. Sc. Pavel Khrebtov

aus Sewerodwinsk

genehmigt von der Fakultät für Mathematik/Informatik
und Maschinenbau
der Technischen Universität Clausthal,

Tag der mündlichen Prüfung

12. September 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Beschreibung der Zielsetzung	1
2	Grundlagen der Prozessüberwachung beim Clinchen	3
2.1	Einordnung des Clinchens	3
2.2	Elemente der Clinchmaschine	5
2.3	Qualitätsbeeinflussende Unregelmäßigkeiten beim Durchsetzfügen	6
2.3.1	Abweichungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück	7
2.3.2	Abweichungen zwischen den Werkzeugen	9
2.3.3	Unregelmäßigkeiten im Werkzeug	10
2.3.4	Unregelmäßigkeiten im Werkstück	12
2.3.5	Zu untersuchende Abweichungsfälle	12
2.4	Normen zur Bewertung von Fügeverbindungen	13
2.4.1	Definition der Qualität	13
2.4.2	Normen zur Qualitätskontrolle	14
2.5	Zerstörungsfreie Online-Kontrolle	15
2.6	Sensorik zur Online-Prozessüberwachung	20
2.6.1	Aufbau des Wegsensors	20
2.6.2	Aufbau des Kraftsensors	21
3	Entwicklung eines Prozessüberwachungssystems	24
3.1	Struktur des Online-Überwachungsprozesses	24
3.2	Ermittlung der Referenzkurve	26
3.3	Aufgabe der Merkmalsextraktion	27
3.4	Bestimmung der Klassifikatoren	30
3.5	Klassifizierung	32
3.6	Ermittlung der Blechdickenabweichung	32
4	Numerische Simulation von Fügeverbindungen	36
4.1	Begriffe und Ablauf der numerischen Simulation	37
4.1.1	Erstellen des Modells	38
4.1.2	Simulationsablauf	39
4.1.3	Auswertung der Simulationsergebnisse	39
4.2	Numerisches Modell des Clinchens	39

4.2.1	Verwendung eines CAD-Modells für eine numerische Simulation.....	39
4.2.2	Vereinfachung des mechanischen Modells von einer Clincheinrichtung.....	40
4.2.3	Symmetrie im Modell des Werkzeugsatzes (Stempel, Matrize, Niederhalter) .	41
4.2.4	Modell des Materials.....	42
4.2.5	Multilineares isotropisches Modell der zu fügenden Bleche.....	43
4.2.6	Starre Körper in der Mehrkörpersimulation	46
4.2.7	Schiebestück als rein elastischer Körper	47
4.2.8	Modellierung der Kontaktflächen	48
4.3	Ablauf und Ermittlung des Kraft-Weg-Verlaufs aus der Simulation.....	48
4.4	Vergleich einer simulierten und einer gemessenen Kraft-Weg-Kurve für den fehlerfreien Clinchpunkt.....	50
5	Simulationsunterstützte Fehlererkennung.....	51
5.1	Geöffnete Schiebestücke.....	51
5.2	Verschlissener Stempel	55
5.3	Falscher Stempel.....	59
5.4	Falsche Matrize.....	62
5.5	Partiell ausgebrochener Stempel	64
5.6	Ausgebrochene Matrize	67
5.7	Falsche Blechpaarung	69
5.8	Bestimmung der Klassifizierungsgrenze	69
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	74
	Literaturverzeichnis.....	76
	Anhang. Ein Modulares Systemkonzept	82

1 Einführung und Beschreibung der Zielsetzung

Die Blechbearbeitung spielt eine bedeutende Rolle in verschiedenen Industriezweigen, insbesondere in der umsatzreichen Maschinenbau- und Fahrzeugbauindustrie [1]. Der sich verstärkende Trend zur Kosteneinsparung in der Produktion [2-4] bei gleichzeitig erhöhten Anforderungen an die Qualitätssicherung verlangt immer intelligentere und rationellere Lösungen in der Fertigung [5, 6]. So werden beispielsweise in der Kraftfahrzeugindustrie im Karosseriebau hohe Anforderungen an die Sicherung und Dokumentation der Qualität der Blechverbindungen gestellt [7]. Zudem erfordert die Verwendung neuer Werkstoffe innovative Fügeverfahren. Obwohl die Clinchtechnik seit mehr als 100 Jahren bekannt ist [8], bleibt sie bis heute ein innovatives mechanisches Fügeverfahren, das in wichtigen Fertigungsbereichen das Punktschweißen abgelöst hat [9-12].

Neben Technik- und Kostenaspekten spielt für die blechverarbeitende Industrie die Überwachung und Rückverfolgbarkeit der objektbezogenen Prozess- und Produktionsdaten gegenüber dem Endkunden eine immer bedeutendere Rolle [13, 14]. Dies hat für die Hersteller der in den Produktionsprozess involvierten Werkzeuge zur Folge, dass neben dem reinen mechanischen Anteil einer Werkzeugmaschine zunehmend die Sensorik und Informationstechnik als Produktfunktionalität der Werkzeugmaschine in den Vordergrund rückt und sich die Alleinstellungsmerkmale und die Produktattraktivität über diese Aspekte definieren. Zu beobachten ist auch, dass sich der Anteil der Wertschöpfung des reinen maschinenbaulichen Anteils der Werkzeugmaschine am Gesamtprodukt in den letzten Jahren deutlich verringert hat. Es ist daher zukünftig unabdingbar, eine Werkzeugmaschine als mechatronisches Gesamtprodukt zu verstehen, das dem Kunden eine Komplettlösung für seine Fertigung und Qualitätssicherungsaufgaben liefert.

Die Qualitätskontrolle beim Clinchen (Durchsetzfügen) erfordert eine ganzheitliche Prozessanalyse und die Entwicklung eines Klassifizierungsverfahrens. Ziel dieser Arbeit ist es, die Überwachungstechnik für die Clinchwerkzeuge und dem Clinchprozess nachhaltig zu verbessern. Hierzu wird die Entwicklung von neuartigen Methoden zur Signalverarbeitung und Signalklassifizierung angestoßen, die auf einer verbesserten Messkurvenanalyse basieren. Durch den Einsatz von modernen mathematischen Methoden zur Merkmalsextraktion, Signifikanzanalyse und statistischen Klassifizierung sollte die Empfindlichkeit und Robustheit der Auswertung verbessert werden.

Eine Simulation mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) kann den Kenntnisstand hinsichtlich der Prozesse, die beim Durchsetzfügen stattfinden, erweitern. Dabei handelt es sich um Simulationen von unterschiedlichen Abweichungen im Werkzeug und im Bauteil sowie deren Auswirkung auf die gemessenen Signale. Eine Untersuchung von „kleinen“ Abweichungen im Fügeprozess und deren Auswirkungen ist hier von großer Bedeutung. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Simulation lassen sich sowohl eine Messkurvenanalyse zur Online-

Prozess-Überwachung erarbeiten, als auch die technische Umsetzbarkeit des Verfahrens nachweisen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Im Anschluss an die Einleitung (Kapitel 1), in der die Ausgangssituation, die Problemstellung, das Ziel der Arbeit sowie Vorgehensweise beschrieben werden, wird das Grundverständnis zum Thema Prozessüberwachung beim Clinchen erworben. Darin werden ein Überblick über die Clinchverfahren sowie den Stand der Technik für Prozessüberwachung gegeben. Kapitel 3 bildet den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Hier wird ein Prozessüberwachungssystem zur Fehlererkennung und Fehlerklassifizierung dargestellt, das die Empfindlichkeit der Prozessanalyse erheblich steigert und auch relativ kleine Fehler erkennt. Dazu werden zahlreiche Messkurven analysiert und für alle relevanten Fehlertypen signifikante charakteristische Eigenschaften extrahiert. Die Simulation der Fügeverbindung mit Berücksichtigung von verschiedenen Fehlern, die im Prozess auftreten können, ist in Kapitel 4 zu finden. Die Einbindung der Simulationsergebnisse in das Prozessüberwachungssystem wird in Kapitel 5 beschrieben. Dabei wird die Analyse der Messkurven am Beispiel der Simulation von wichtigen Fehlertypen erläutert. Im sechsten Kapitel dieser Arbeit erfolgt eine Zusammenfassung nebst Ausblick.

2 Grundlagen der Prozessüberwachung beim Clinchen

Die Prozessüberwachung beim Clinchen stellt den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit dar. Daher soll im Folgenden zunächst der Stand der Technik erörtert werden. Zunächst wird dabei erläutert, wie das Clinchen in eine Reihe von Fügeverfahren eingeordnet werden kann. Danach werden die Elemente der Clinchmaschine beschrieben. Weiterhin werden die einzelnen qualitätsbeeinflussenden Unregelmäßigkeiten beim Durchsetzfügen analysiert und Normen zur Bewertung von Fügeverbindungen näher beleuchtet. Es folgt ein kurzer Überblick über konventionelle Überwachungssysteme, die bei der zerstörungsfreien Online-Kontrolle heutzutage in der Industrie ihre Anwendung finden. Abschließend werden die wesentlichen Sensoren bei diesem Prozess zusammenfassend dargestellt.

2.1 Einordnung des Clinchens

Mit dem englischen Wort „Clinchen“ wird eine Reihe von umformtechnischen Fügeverfahren bezeichnet, die ohne jegliche Hilfsfügeteile auskommen. Bezogen auf die Normen DIN 8580 und DIN 8593-0 wird der Begriff des Fügens durch Umformen als ein auf Dauer angelegtes nichtlösbares Verbinden von mindestens zwei Werkstücken geometrisch bestimmter fester Form definiert. Bild 2.1 stellt eine Übersicht über die Fertigungsverfahren und die Zuordnung des Durchsetzfügens nach DIN 8593-5 [15] dar.

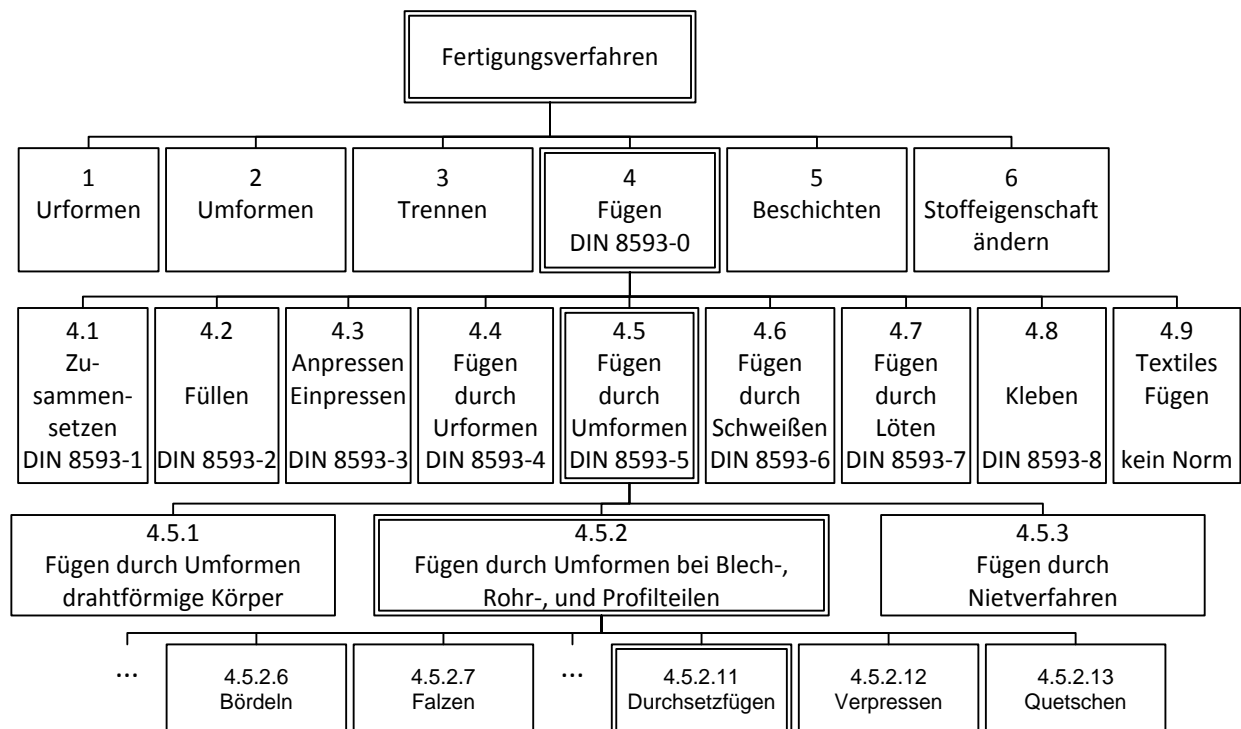


Bild 2.1. Übersicht über die Fertigungsverfahren

Zum Fügen durch Kaltumformen von überlappenden Blech-, Rohr- und Profilteilen wird mittels Clincheinsätzen, d.h. eines Druckfügestempels und einer Druckfügematrize, das Werk-

stück durchgesetzt. Anhand der Blechdicke und der verwendeten Blechwerkstoffe sowie der Fügepunktgeometrie (rund- oder balkenförmig) lässt sich eine Fügeaufgabe bezeichnen. Beim Fügen findet ein gemeinsames Durchsetzen der Fügepartner statt, und durch ein nachfolgendes Stauchen im Bodenbereich wird die Verbindung auch in der Breite verformt, wodurch sowohl ein Form- als auch Kraftschluss erfolgt. Bild 2.2 [16] stellt die einzelnen Phasen dar [17] und im Bild 2.3 sind Querschliffe des Clinchpunktes zu sehen. Ein Stoffschluss kann in speziellen Fällen, z.B. beim Clinchen unter thermischem Einfluss, erfolgen [18]. Bild 2.4 stellt das Prinzip der verschiedenen Schlussarten dar [17, 19]. Beim Clinchen werden keine Verbindungselemente, Zusatz- oder Hilfsstoffe verwendet. Oft wird mechanisches Durchsetzfügen in Verbindung mit Kleben im Karosseriebau eingesetzt [20].

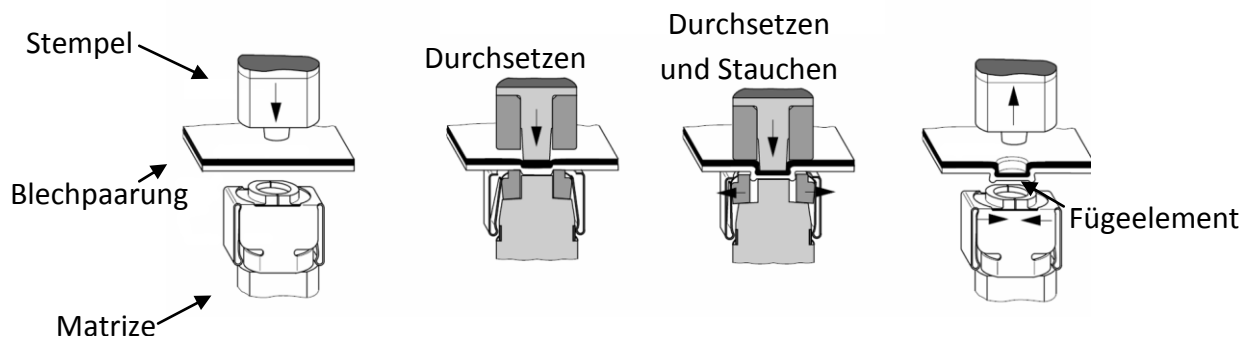


Bild 2.2. Phasen beim Clinchen ohne Schneidanteil

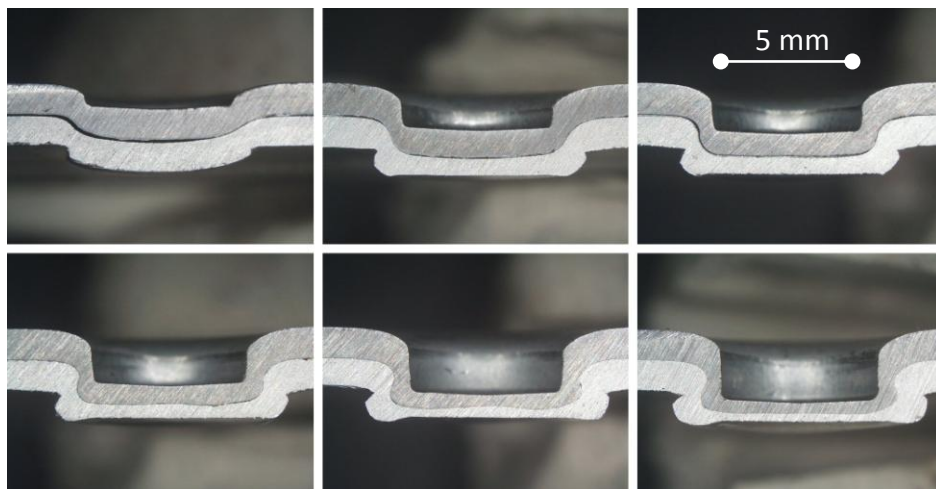


Bild 2.3. Querschliffe des Clinchpunktes für verschiedene Stufen

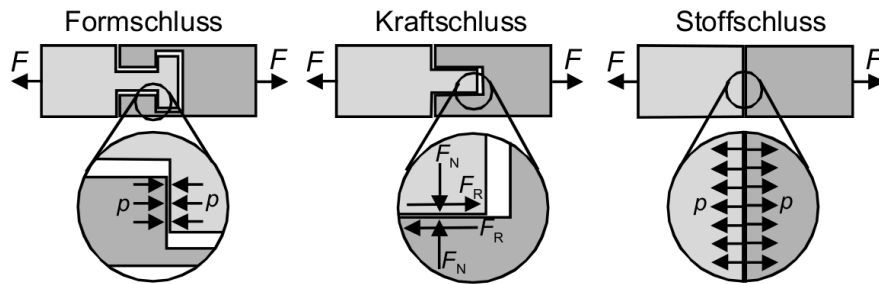


Bild 2.4. Prinzip verschiedener Schlussarten. Beim Durchsetzfügen liegen ein Form- und Kraftschluss vor.

2.2 Elemente der Clinchmaschine

Heutzutage werden Clinch-Maschinen mit hydraulischen, alternativ mit pneumohydraulischen oder elektrischen Antrieben, realisiert. Im Bild 2.5 ist eine Maschine mit einem hydraulischen Antrieb dargestellt.

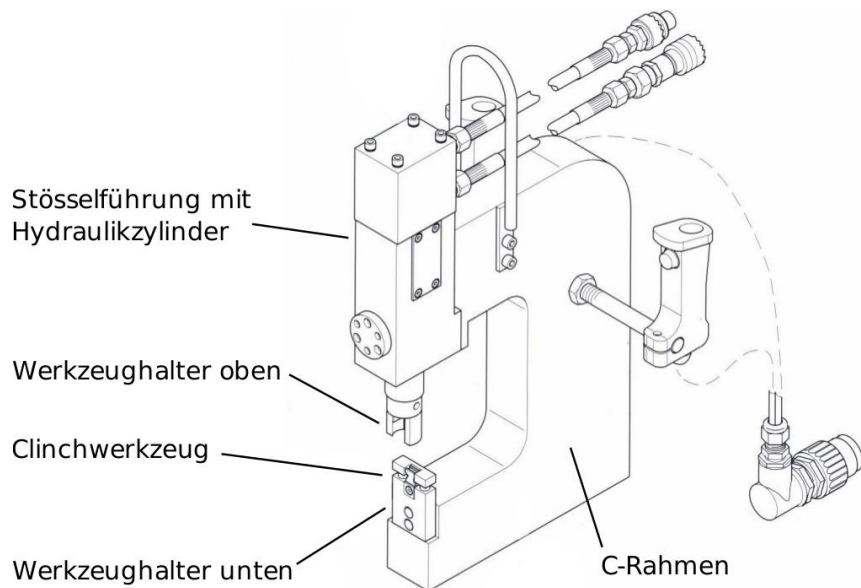


Bild 2.5. Clinchmaschine mit hydraulischem Antrieb. Teile: Stößelführung mit Hydraulikzylinder, Werkzeughalter oben; Clinchwerkzeug; Werkzeughalter unten; C-Rahmen

Die Außengeometrie der Clinchmaschine wird durch den Rahmen definiert. Der Rahmen wird oft „C-Rahmen“ oder „C-Bügel“ genannt. Auf dem C-Rahmen wird ein Antrieb mit dem Stößel montiert. Im Bild 2.5 wird ein Hydraulikzylinder dargestellt. Am Ende des Stößels ist ein oberer Werkzeughalter montiert. Gegenüber, auf der unteren Seite des C-Rahmens (Bügelhorn), befindet sich ein unterer Werkzeughalter. Oft werden oben ein Stempel und unten eine Matrize montiert. Der Niederhalter, ein Bestandteil des Werkzeughalters mit dem Stempel, ist durch eine Feder vorgespannt. Der Niederhalter trifft beim Clinchen mit dem Stempel auf das obere Blech und spannt die Bauteile während des gesamten Fügeprozesses.

im Fügebereich zusammen. Er verhindert damit das Aufbiegen der Bleche durch den beim Durchsetzen des Stempels verursachten Materialeinzug.

Bild 2.6 zeigt Clincheinsätze am Beispiel des runden Druckfüge-Werkzeugs (R-DF), wobei das Werkzeug aus zwei verschraubbaren Segmenten besteht. Das untere Segment besteht aus der Matrize, den Schiebestücken und der Haubenfeder (siehe Bild 2.7). Das obere Segment besteht aus dem Stempel. Da die mechanischen Belastungen in diesem Bereich am höchsten sind, werden alle Bauteile des Clinchwerkzeuges gehärtet.

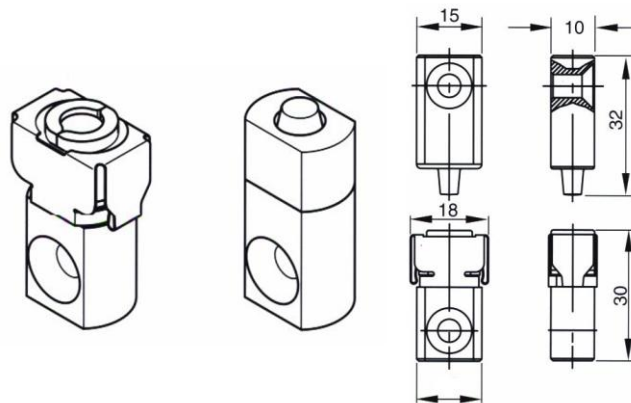


Bild 2.6. Beispiel des runden Druckfüge-Werkzeugs (R-DF)



Bild 2.7. Fotos von Amboss, Schiebestücke, Haubenfeder und Stempel (von links)

2.3 Qualitätsbeeinflussende Unregelmäßigkeiten beim Durchsetzfügen

In einer Produktion unter nicht idealen Bedingungen übt das Umfeld einen Einfluss auf die Qualität eines Clinchpunktes aus. Die Verringerung der Qualität eines Fügeelements beispielsweise in Form einer geringen Tragfähigkeit oder Verletzung der Dichtung können als Konsequenz aus verschiedenen Abweichungen bzw. Unregelmäßigkeiten im Prozessablauf auftreten. Diese Unregelmäßigkeiten, die in den Durchsetzfügeanlagen auftreten können, werden im Folgenden näher betrachtet. Die Unregelmäßigkeiten lassen sich in Gruppen zuordnen:

- Abweichungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück,
- Abweichungen zwischen den Werkzeugen (Stempel und Matrize),
- Unregelmäßigkeiten im Werkzeug (Stempel und Matrize),
- Unregelmäßigkeiten im Werkstück.

Um einen Eindruck über die möglichen Fehler zu bekommen, werden diese im Weiteren näher erläutert.

2.3.1 Abweichungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück

Eine detaillierte Untergliederung dieser Gruppe ist in Bild 2.8 [21] im linken Ast zu sehen. Beim Durchsetzfügen sind das Werkzeug und das Werkstück zwei unabhängige Körper mit eigenen Koordinatensystemen. Durch das Körpereigene- und Bezugskoordinatensystem lassen sich das Werkzeug und das Werkstück räumlich anordnen (Bild 2.9 [22]). Die Abweichungen in Position und Orientierung des Körpers lassen sich mithilfe einer Translation und Drehung beschreiben.

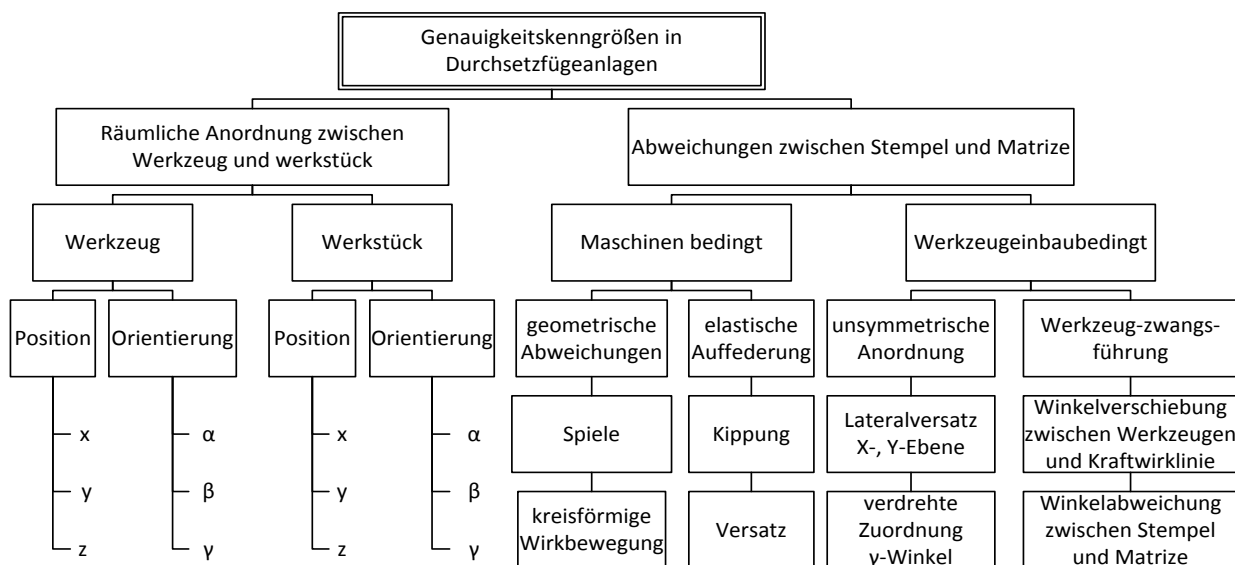


Bild 2.8. Genauigkeitskenngrößen in Durchsetzfügeanlagen

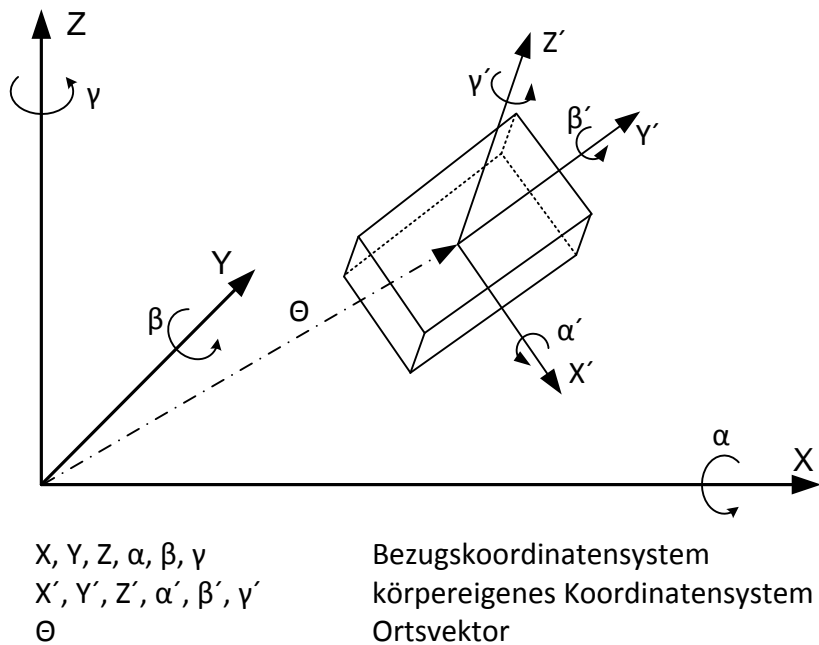


Bild 2.9. Koordinatensysteme in der Handhabungstechnik

Bild 2.10 links stellt die Positionsabweichungen in den Richtungen parallel zu den Achsen X, Y und Z dar [21]. Bild 2.10 rechts zeigt die Orientierungsabweichungen in den Drehrichtungen α , β und γ .

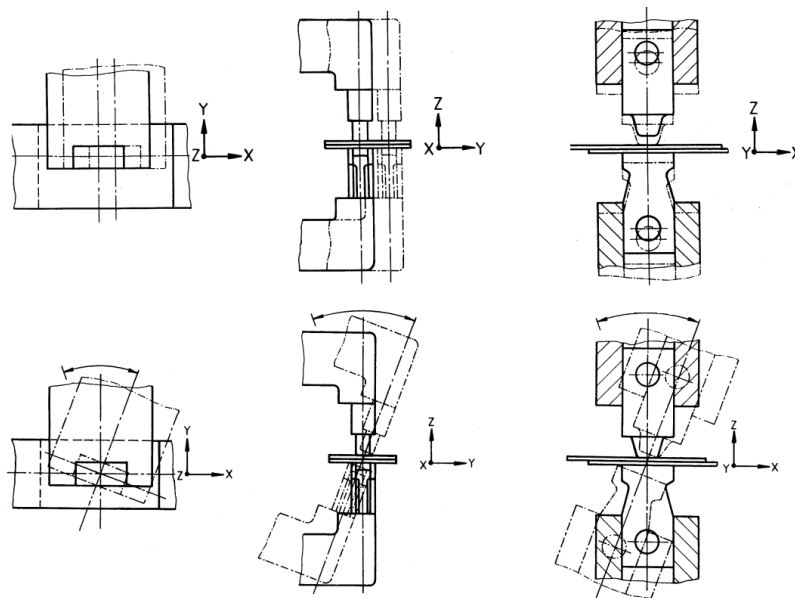


Bild 2.10. Positions- und Orientierungsabweichungen zwischen Werkzeugen und Werkstücken beim Durchsetzfügen: Abweichungen in X-,Y-,Z-Richtungen (oben), Abweichungen um die Z-,X-,Y-Achsen (unten)

Die Beeinflussung solcher Abweichungen auf die Qualität eines Fügeelements kann sowohl unbedeutend gering als auch unakzeptabel sein. Bei einer Verschiebung innerhalb der XY-

Ebene kann der Clinchpunkt z.B. auf eine falsche Stelle gesetzt werden. Dabei wird die Haltbarkeit des Fügelements zwar nicht verletzt, jedoch befindet sich die Fügestelle auf einem sichtbaren statt bedecktem Platz oder es wird überhaupt kein Clinchpunkt gesetzt, da das Werkstück komplett falsch zugeordnet wird. Bei einer Verschiebung in Richtung der Z-Achse kann das Blech zusätzlich gezogen bzw. deformiert werden.

Ein Clinch-Gerät ist in der Regel so konstruiert, dass bei der Aufbringung der maximalen Fügekraft keine plastischen Verformungen an dem Rahmen auftreten. Da die Abmessungen des dem Stößel gegenüberliegenden Bügelhorns wegen der Zugänglichkeit der Fügestelle oft so ausgelegt werden müssen, dass das Bügelhorn keine Dauerfestigkeit, sondern nur Zeitfestigkeit aufweist, können plastische Verformungen des Bügel-Rahmens nicht ausgeschlossen werden. In solchen Fällen werden die Bügel-Rahmen als Austauschteile konstruiert und als Verschleißteile deklariert. Aus diesem Grunde stellt dieser Fall keinen Gegenstand der Untersuchungen dar.

2.3.2 Abweichungen zwischen den Werkzeugen

Die Position von Stempel und Matrize wird vor dem Gebrauch ausgerichtet. Die beiden Teile des Werkzeugsatzes müssen coaxial sein. Die Abweichungen in dem Drehwinkel der Matrize wirken auf die maximale Zugrichtung ein [21].

Denkbar sind Abweichungen zwischen der Fügekraftwirklinie (Hubrichtung) und den Werkzeugen und dem Werkstück (Bild 2.11 [21]). Dabei sind Stempel, Matrize sowie das Werkstück richtig zugeordnet. Diese Abweichung führt zu einer horizontalen Verschiebung des Werkzeugsatzes bei der Krafteinwirkung. Die Größe der Verschiebung ist vom Winkel zwischen der Hubrichtung und der Werkzeugachse abhängig.

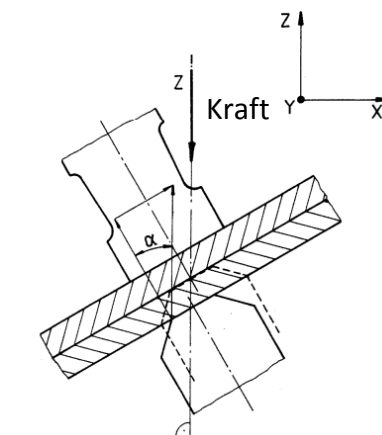


Bild 2.11. Relativbewegungen zwischen den Werkzeugen in der XY-Ebene durch Winkelverschiebung zwischen den Werkzeugen und der Kraftwirklinie

2.3.3 Unregelmäßigkeiten im Werkzeug

Insbesondere in der Serienproduktion wird der Werkzeugsatz ständig belastet. Dieses führt zur Materialermüdung und hat mitunter einen totalen oder partiellen Matrizen- (Bild 2.12) bzw. Stempelbruch (Bild 2.13) zur Folge.



Bild 2.12. Matrize mit ausgebrochenem Amboss

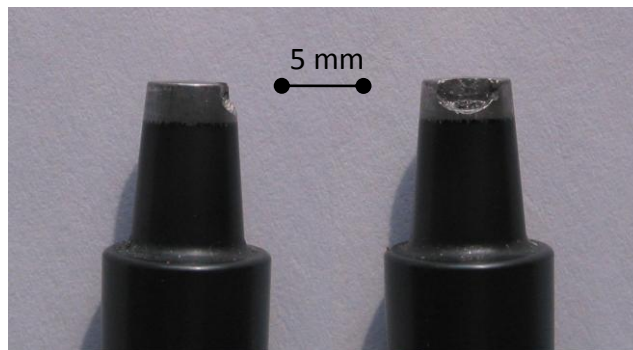


Bild 2.13. Stempel mit partiell ausgebrochener Stempeldruckfläche
(links: Seitenansicht, rechts: Draufsicht)

Es ist ebenfalls möglich, dass ein Werkstoffauftrag an der Kontaktfläche des Stempels oder der Matrize anhaften kann. Dieser Fall ist beim Durchsetzfügen von Werkstücken aus Aluminium sehr häufig anzutreffen [23]. Diese Situation kann teilweise durch Verwendung beschichteter Stempel und Matrizen sowie Besprühen der Kontaktfläche vermieden werden.

Bei Verwendung einer Matrize mit beweglichen Teilen kann es passieren, dass sich nach dem Arbeitsprozess bzw. vor dem Beginn des nächsten Clinchvorgangs die Schiebestücke nicht vollständig schließen, d.h. ein oder sogar beide Schiebestücke noch etwas geöffnet sind. Dies kann beispielsweise durch eine verschmutzte Matrize oder ein nicht funktionsfähiges Schiebestückrückfederungselement (Haubenfeder) auftreten. Im Bild 2.14 ist eine Matrize (Ansicht von oben) mit einem offenstehenden Schiebestück dargestellt. Die Haubenfeder auf der linken Seite ist gerissen und führt das Schiebestück daher nicht zur Mitte zurück.



Bild 2.14. Matrize mit einem offenstehenden Schiebestück
(Riss der Haubenfeder)

Einer der am schwierigsten zu detektierenden Fehler, der im Betrieb auftreten kann, ist der allmähliche Abrasionsverschleiß des Übergangsradius von der Stempeldruck- zur Stempel-mantelfläche. Die Form des Stempels kann dabei am Ende wie ein konisch zulaufender Zylinder beschrieben werden. Der Rand der Stirnseite des Stempels, d.h. der Stempeldruckfläche, bildet dabei keine scharfe Kante zur Stempel-mantelfläche, sondern ist leicht abgerundet mit einem Krümmungsradius. Obwohl der Stempel selber aus gehärtetem Metall gefertigt ist, vergrößert sich der Stempelrandradius mit zunehmender Anzahl von Lastwechseln. Beträgt der Stempelradius für einen neuen Stempel noch z.B. $R = 0,2 \text{ mm}$, so weist er nach 100 000 – 200 000 Arbeitsgängen bereits einen Wert von bis zu $R = 0,4 \text{ mm}$ auf (Bild 2.15). Dieser Verschleiß rundet den Stempel ab und macht ihn schmaler und führt so zu einer Verminderung der Belastungsfähigkeit des Clinchpunktes [24].

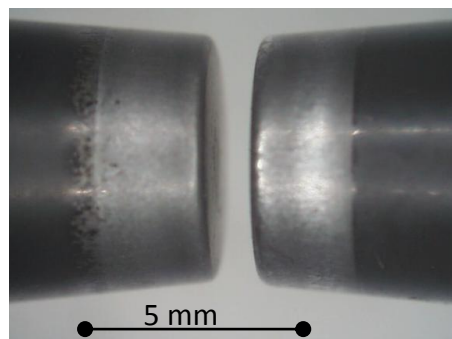


Bild 2.15. Verschleiß am Übergangsradius des Stempels. Stempel mit $R = 0,2 \text{ mm}$ (links),
mit $R = 0,4 \text{ mm}$ (rechts)

Für unterschiedliche Blechpaarungen werden vom Hersteller entsprechende Stempel-Matrizen-Kombinationen in verschiedenen Varianten bereit gestellt. Die Kombinationen sind z.B. aus der Auswahltabelle in [16] ersichtlich. Es kann vorkommen, dass aus Versehen ein falsches Werkzeug verwendet wird und somit beispielweise Stempel mit unterschiedlichen Durchmessern und somit anderen Stempel-Volumina, die ins Blech eingefügt werden, mit unterschiedlichem Druck auf das den Stempel umgebende Metall wirken. Die Matrizen unterscheiden sich in der Durchsetztiefe, bzw. dem Abstand zwischen Amboss- und Schiebestück-Flächen. Eine Installation einer falschen Matrize führt zu einer Veränderung der Bondendicke. Im Bild 2.16 sind zwei Matrizen mit unterschiedlichen Tiefen dargestellt.

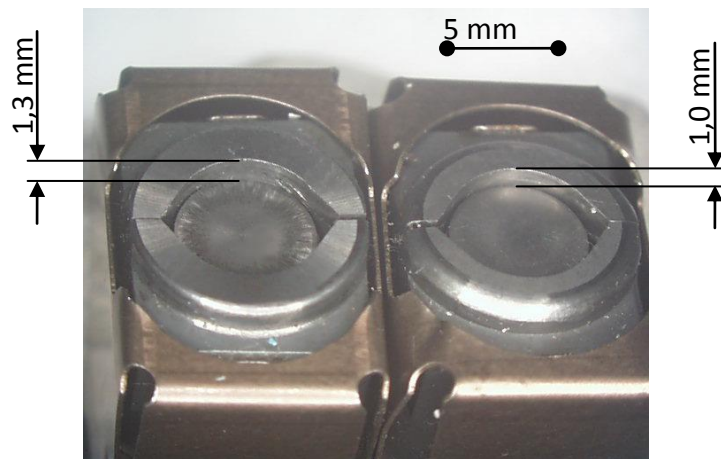


Bild 2.16. Vergleich von Matrizen mit variierenden Tiefen: 1,3 mm (links) und 1,0 mm (rechts)

2.3.4 Unregelmäßigkeiten im Werkstück

Zu den Unregelmäßigkeiten im Werkstück gehören Schwankungen der Blechdicke, der Festigkeitskenngrößen sowie der Blechbeschichtungsdicken und -mengen. Die Sollwerte dieser Eigenschaften unterliegen typischerweise den Abweichungen vom Normwert, welche in einem definierten begrenzten Toleranzbereich liegen. Diese Schwankungen sind bei der Prozessüberwachung üblicherweise zu tolerieren. Es kann vorkommen, dass beölte und gewaschene Werkstücke geclincht werden [25]. Dieses sollte vom Anwender ausgeschlossen werden, was aber in der Praxis nicht gewährleistet wird. Hat das Blech beim Clinchvorgang z.B. eine zusätzliche Abdeckung in Form einer Schutzfolie oder wird ein falscher Werkstoff verwendet, ist dieses als ein Fehler zu betrachten.

2.3.5 Zu untersuchende Abweichungsfälle

Bei der Entwicklung eines Online-Prozessüberwachungssystems werden die Abweichungsfälle von besonderem Interesse sein, die am häufigsten unmittelbar während der Produktion auftreten. Demgemäß werden diejenigen Fälle, die bei der Endkontrolle des Clinchsystems (z.B. in einer Qualitätssicherungsabteilung) oder während der Inbetriebnahme beseitigt werden können, aus der Online-Prozessüberwachung ausgeschlossen. Dazu zählen Positions- und Orientierungsabweichungen zwischen Werkzeugen (siehe Abschnitt 2.3.1) oder zwischen Werkzeugen und Werkstücken (siehe Abschnitt 2.3.2). Andererseits treten die Unregelmäßigkeiten im Werkzeug oder im Werkstück (siehe Abschnitte 2.3.3 und 2.3.4) nur während der Produktion auf. Diese sind Gegenstand des Online-Überwachungssystems und der vorliegenden Untersuchungen. Die folgende Liste zeigt die einzelnen Abweichungen während des Clinchvorgangs, die im Rahmen dieser Arbeit fokussiert untersucht werden:

Abweichungen am Werkzeug:

- Ausgebrochener Stempel
- Ausgebrochene Matrize

- Offenstehende(s) Schiebestück(e)
- Verschlissener Stempel
- Falscher Stempel- oder Matrizen-Typ

Abweichungen am Werkstück:

- Blechdickenabweichung
- Abweichungen bei den Materialeigenschaften bzw. falsche Blechpaarung
- Zusätzliche Abdeckung und Zustand der Oberfläche (Farbe, Öl, Folie)

2.4 Normen zur Bewertung von Fügeverbindungen

2.4.1 Definition der Qualität

Die Fügetechnik wird bei Konstruktionen in verschiedenen Arten verwendet. Die hergestellten Baugruppen werden durch statische, zyklische und schlagartige Belastungen und deren Kombinationen beansprucht (siehe [26-28]). Deswegen müssen die Fügeverbindungen entsprechende Anforderungen gewährleisten. Die Festigkeit bzw. Qualität einer runden Clinchverbindung wird maßgeblich durch die geometrischen Größen bestimmt [29] (Bild 2.17 [30]):

- **Halsdicke**
Durch die Stauchung des stempelseitigen Bleches wird die Halsdicke gegenüber der zu fügenden Blechdicke reduziert. Im Falle einer Scherbelastung ist dieses Maß für die Tragfähigkeit der Verbindung entscheidend [31].
- **Hinterschnitt**
Das Stauchen der Bleche im Fügeprozess erzeugt den Hinterschnitt. Wird die Verbindung auf Kopfzug belastet, so ist die Tragfähigkeit von der Ausprägung des Hinterschnittes im Clinchpunkt abhängig [31].
- **Bodendicke**
Die Bodendicke (Restbodendicke) hat einen Einfluss auf die Haltekraft der Verbindung [31] und ist ein Kontrollmaß, das einen Bezug zur Qualität des Clinchpunktes aufweist.

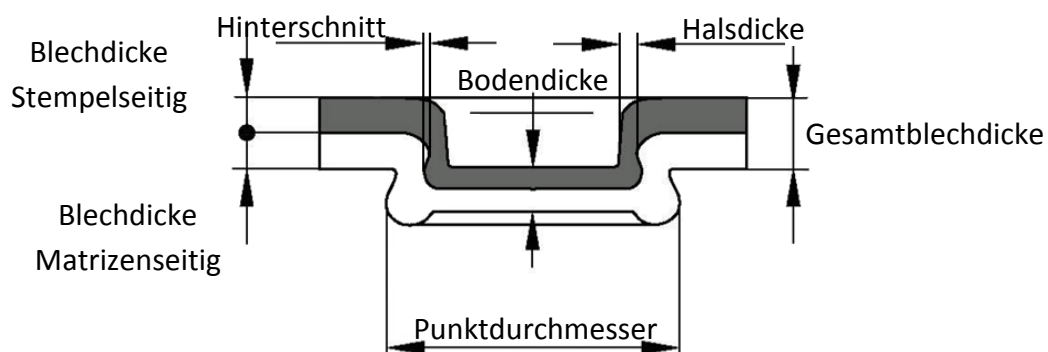


Bild 2.17. Geometrie der Clinchverbindung

2.4.2 Normen zur Qualitätskontrolle

Im Merkblatt Nr. 3420 vom „Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.“ (DVS) und der „Europäischen Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.“ (EFB) [30] werden verschiedene Verfahren zur Festigkeitsprüfung einer Clinchverbindung vorgestellt. Diese werden in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterteilt. Die zerstörende Prüfung umfasst folgende Verfahren:

- ein **Makroschliff** lässt die Ausbildung der Verbindung (Hinterschnitt, Halsdicke, Symmetrie, Rissfreiheit usw.) mit einem Mikroskop beurteilen. Die Beispiele sind im Bild 2.3 zu sehen.
- mittels einer **Festigkeitsuntersuchung** werden für quasistatische Zugversuche [32] (Bild 2.18 [17])
 - Scherzugversuche (in Anlehnung an DIN EN ISO 14273 [33]),
 - Schälzugversuche (in Anlehnung an DVS29160),
 - Kopfzugversuche (in Anlehnung an DIN EN ISO 14272 [34]).

und dynamische Prüfungen durchgeführt [35], die i.d.R. die maximale Scherzug-, Kopfzug- bzw. Schälzugkraft ermitteln.

Die zerstörende Prüfung ist für die Festlegung der Clinchwerkzeuge und der Clinchparameter geeignet. Aus Kostengründen kann sie allerdings nur einen ergänzenden Einsatz in der Serienfertigung finden. Zudem erlaubt sie natürlich nur stichprobenartige Prüfungen.

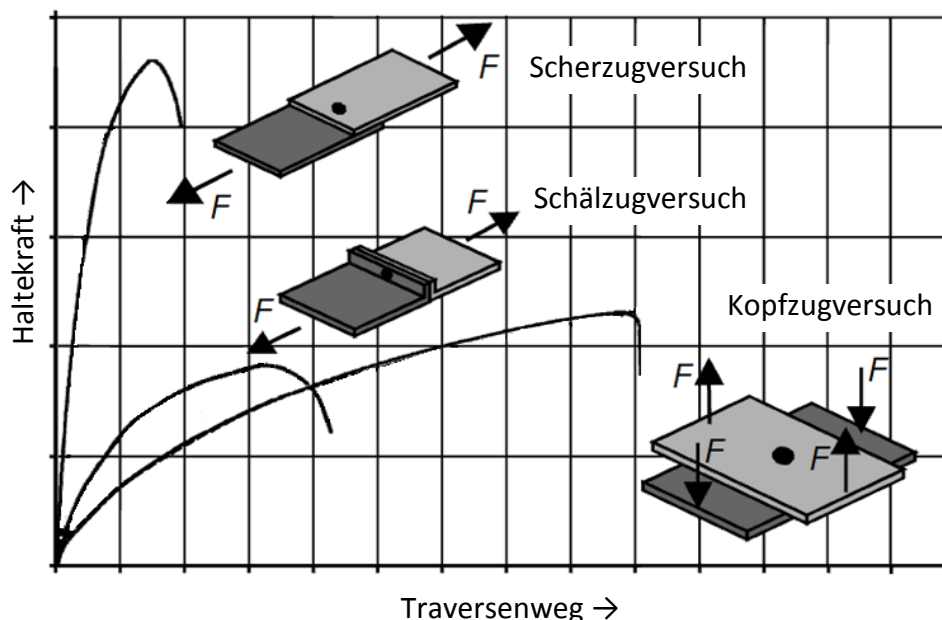


Bild 2.18. Quasistatische Festigkeitsuntersuchung

Die zerstörungsfreie Prüfung umfasst folgende Verfahren:

- **visuelle Kontrolle** lässt die Vollständigkeit und Symmetrie der Clinchpunktausbildung sowie die Rissfreiheit kontrollieren;
- **Geometriemessung** ermöglicht eine Kontrolle der Bodendicke und des Außendurchmessers. Üblicherweise wird die Bodendicke mit einem Messtaster gemessen (Bild 2.19 [16]) und mit dem angestrebten Wert verglichen. Dieser Soll-Wert muss für die entsprechende Blechpaarung ermittelt werden. Für geteilte Matrizen gibt es auch die Möglichkeit den erzielten Außendurchmesser mit der Sollvorgabe zu vergleichen;
- **Online-Kontrolle** ermöglicht die Durchführung einer bedienerunabhängigen Überwachung. Für die vorliegende Arbeit ist die Methode der Online-Kontrolle von besonderer Bedeutung. Deshalb wird sie im folgenden Abschnitt genauer beleuchtet.

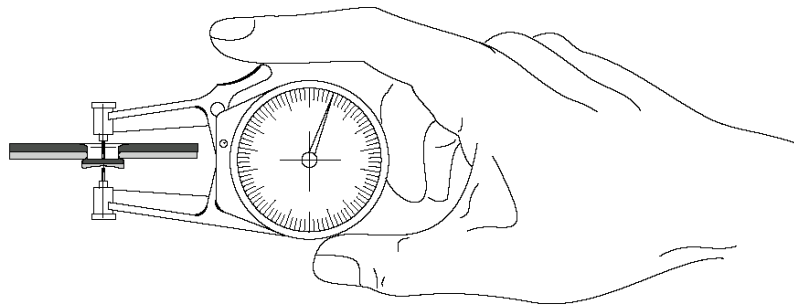


Bild 2.19. Messung der Bodendicke

2.5 Zerstörungsfreie Online-Kontrolle

Das typischerweise eingesetzte Verfahren zur Online-Prozessüberwachung beim Clinchen basiert auf der Analyse einer Kraft-Weg-Kurve [36]. Hierbei wird die charakteristische Beziehung zwischen dem Stempel- bzw. Matrizenweg (Stößelweg) und der dafür erforderlichen Fügekraft analysiert. Kraft und Weg werden dazu durch entsprechende Sensoren prozessbegleitend gemessen. Für einen ausgewählten Werkzeugsatz und eine gewählte Blechpaarung sind die daraus resultierenden Kraft-Weg-Kurven alle weitgehend ähnlich zueinander. Im Prinzip kann die Kraft-Weg-Kurve in verschiedene Abschnitte bzw. Phasen unterteilt werden (siehe Bild 2.20). Zunächst erfolgt das Spannen der beiden Fügeteile. Sind beide Bleche aufeinander gepresst, so folgt die Durchsetzphase. Abschließend tritt zusätzlich noch eine Stauchphase auf.

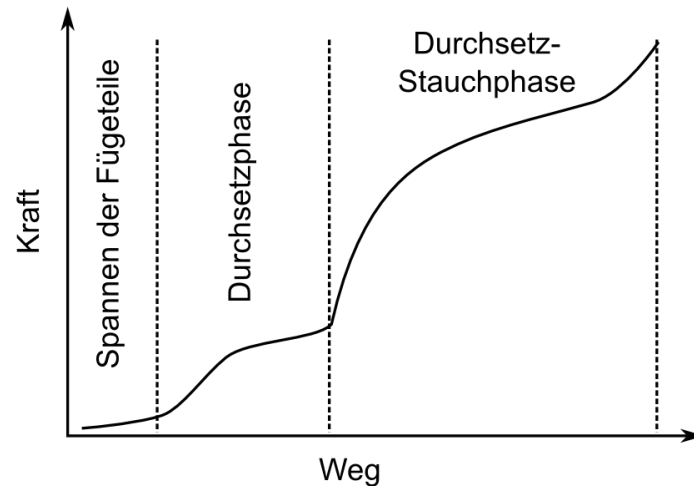


Bild 2.20. Kraft-Weg-Verlauf eines Durchsetzfüge-Prozesses

Im Laufe der Zeit hat sich eine Vielzahl von Prozessüberwachungssystemen entwickelt. In Tabelle 2.1 [37] werden unterschiedliche Auswertungsverfahren zusammengefasst und in Bezug auf ihre Hauptmerkmale analysiert [37, 38].

Tabelle 2.1. Auswertungsverfahren zur Online-Überwachung beim Radialclinchen

Auswertungsverfahren	Grenzwert	Toleranzfenster	Hüllkurven	Neuronale Netze
Prinzipbild				
Merkmale				
Integration in den Prozess	einfach	einfach	einfach	mittel
Möglichkeit zur Klassifizierung	gering	mittel	mittel	hoch
Umrüstaufwand	gering	gering	gering	hoch
Zuverlässigkeit	gering	mittel	mittel	hoch
Anwendung von präzisen Fehlerfallstrategien	schwierig	mittel	schwierig	einfach
Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse	gering	gering	gering	mittel
Interpretierbarkeit	gut	gut	gering	mittel

Eine sehr einfache und gebräuchliche Variante stellt die Grenzwert-Überwachung der beim Clinch-Prozess auftretenden maximalen Werte von Kraft und Weg dar [21, 39, 40]. Liegen diese außerhalb eines vorher festgelegten Toleranzbereichs, so wird dies als Hinweis auf einen Fehler gewertet. Dieses Verfahren lässt lediglich geringe Anteile des Fehlers erkennen.

Die sogenannte „Fenster-Technik“ [30, 40, 41] ist die Betrachtung von lediglich ausgewählten Bereichen an der Kraft-Weg-Kurve, sogenannten Toleranzfenstern, welche anwendungsspezifisch auf einer Referenzkurve verteilt werden. Hierbei kann z.B. die Kraft in der Endlage des Stempels als ein charakteristischer Bereich angenommen werden. Die Fenster können als Ausschnitte betrachtet werden, so dass diese jeweils aus vier Begrenzungslinien bestehen. Eine Verbindung wird als fehlerhaft bewertet, sobald die gemessene Kraft-Weg-Kurve nicht durch eines der vorgegebenen Fenster verläuft. Bild 2.21 verdeutlicht dieses Verfahren.

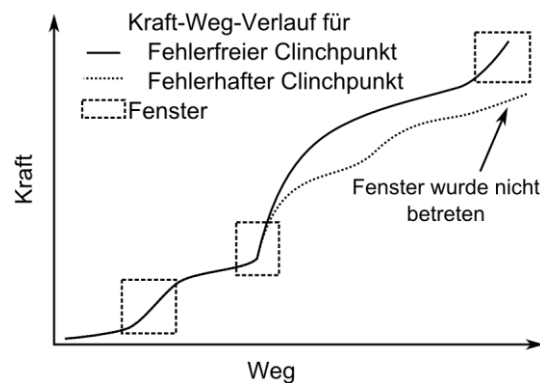


Bild 2.21. Kraft-Weg-Analyse mit Fenster-Technologie

Eine weitere Möglichkeit, die Fehler beim Clinch-Prozess zu erkennen, ist das Hüllkurvenanalyseverfahren [42]. Dabei werden die Veränderungen der Kraft-Weg-Kurve beobachtet, welche durch einen fehlerhaften Clinch-Prozess hervorgerufen werden. Bei der konventionellen Online-Kontrolle werden die Abweichungen einer gemessenen Kraft-Weg-Kurve zu einer vorher ermittelten Referenzkurve untersucht. Zur Bestimmung der Abweichungen wird entlang der gesamten Kurve das sogenannte Toleranzband festgelegt, das zeigt inwieweit die Kraft-Weg-Kurve abweichen darf. Verlässt die tatsächlich gemessene Kurve, wie im Bild 2.22 verdeutlicht, das Toleranzband an irgendeiner Stelle, so wird ein fehlerhafter Clinchprozess angenommen.

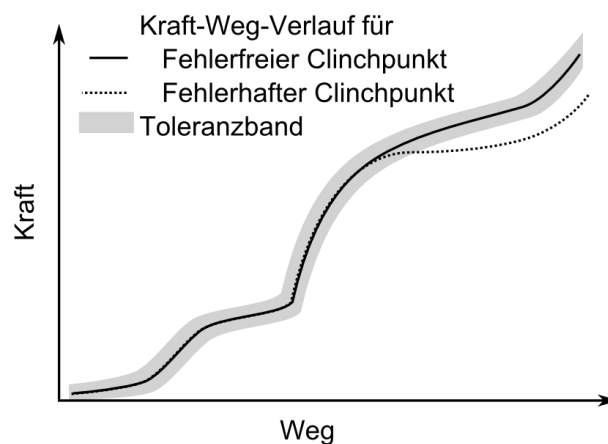


Bild 2.22. Kraft-Weg-Verlauf mit Toleranzband

Die große Schwierigkeit bei diesem Verfahren liegt in der Wahl der Breite des Toleranzbands. Diese hängt wesentlich von verschiedenen Aspekten ab, die im regulären Prozess auftreten können und entsprechend berücksichtigt werden müssen, wie zum Beispiel:

- einer Abweichung der Blechdicke;
- einer Abweichung der Blechfestigkeit;
- dem Einsatz von Zusatzmedien (Dicke von Öl, Kleber);
- einer Blech-Verformung (klaffende Bleche).

Das Toleranzband muss daher so groß gewählt werden, dass bei allen möglichen Kombinationen dieser Aspekte eine Kraft-Weg-Kurve eines korrekten Clinch-Vorgangs innerhalb der Grenzen bleibt. Der große Nachteil ist eine dadurch verursachte Verminderung der Empfindlichkeit des Überwachungssystems bei kleineren Fehlern.

Eine Möglichkeit, das Problem der „kleinen Fehler“ zu lösen, ist als „Warzentechnik“ bekannt und ist in [43] erwähnt. Das Verfahren lässt es zu, auch die kleinen Fehler unter Berücksichtigung zweier folgender Umstände zu identifizieren:

- ein Fehler bildet die Abweichungen von der Kraft-Weg-Kurve in gleichen Bereichen ab;
- der gleiche Fehler tritt ebenfalls bei folgenden Clinchvorgängen wiederholt auf, was die Trennung zufälliger von systematischen Fehlern ermöglicht.

Auf der Bildschirmaufnahme des Programms „Vision 100“ der Fa. Schwer+Kopka (Bild 2.23, eigene Aufnahme) ist eine Überschreitung im mittleren Bereich einer Kraft-Weg-Kurve zu sehen. Mit der Warzentechnik werden die Abweichungen entlang der gesamten Kraft-Weg-Kurve für einige der letzten Clinch-Ereignisse summiert. Überschreitet die ausgerechnete Abweichungssumme einen Schwellwert, werden die in der Berechnung verwendeten Clinchpunkte als fehlerhaft angenommen. Mit dem Verfahren lassen sich kleine Abweichungen detektieren, was jedoch erst nach einer Verzögerung durch die Messwertaufnahme möglich ist.

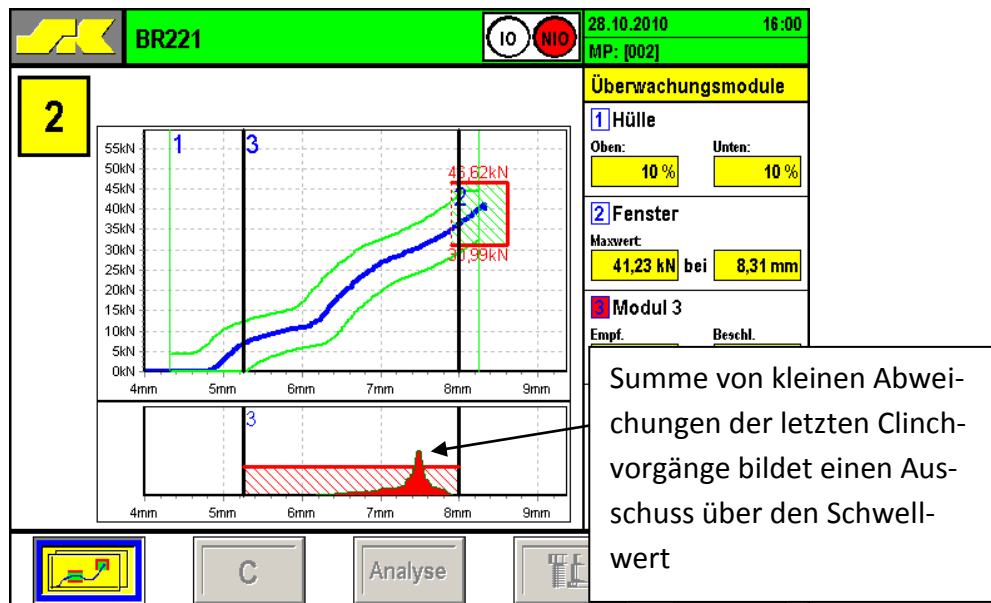


Bild 2.23. Warzenmaster der Firma Schwer+Kopka erkennt den Ausschuss im mittleren Bereich der Kraft-Weg-Kurve und bewertet die Ergebnisse als „nicht in Ordnung“

Eine Methode für die Berücksichtigung der Abweichungen, die durch Änderungen der Materialeigenschaften oder des Werkzeugverschleißes verursacht werden, wird in [44] vorgeschlagen. Sie bezieht sich auf eine relative Verschiebung der Fensterlage in Abhängigkeit zum Mittelwert eines anderen Fensters (Bild 2.24 [44])

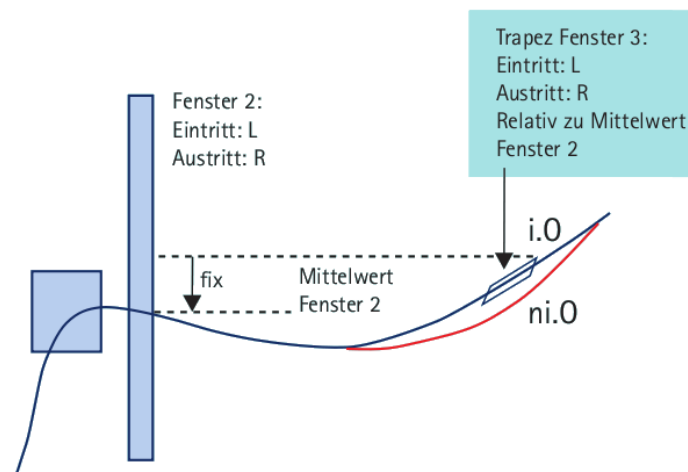


Bild 2.24. Verankerung eines Toleranzbereichs für eine Position der Kurve im Fenster

Eine weitere Gruppe der Überwachungsverfahren schließt die Entwicklung der künstlichen Intelligenz (KI) ein und nutzt die Methoden von neuronalen Netzen für die Auswertung der Prozessdaten beim Schweißen und Clinchen [41, 45-47]. Die künstlichen neuronalen Netze haben den Vorteil, dass die Klassifizierung des Prozesszustands auch bei unbekannten Zusammenhängen zwischen Prozessdaten möglich ist. Dabei werden Prozessdaten verschiedener Art zusammengefügt [48]. Der „Einlernen-Prozess“ (Definition der Parameter der Neuronen) besteht aus der Analyse von mehreren gemessenen Datensätzen und deren Zuordnung

zum bekannten Prozesszustand. Dabei funktioniert das Netz als ein geschlossenes System und erlaubt demzufolge keine Analyse der Zusammenhänge von Daten, sodass eine Anpassung der Parameter nicht in übersichtlicher Form erfolgen kann.

Die Online-Prozessüberwachung bringt wesentliche Vorteile für die Qualitätssicherung:

- der Clinch-Prozess wird vollständig kontrolliert;
- Ausschussquote wird durch einen Schnellhalt (Stop) des Fertigungsprozesses reduziert;
- Möglichkeit zur Fehleranalyse;
- Dokumentation und Nachweis der Verbindungsqualität.

2.6 Sensorik zur Online-Prozessüberwachung

Für die Überwachungsmethoden, die auf der Kraft-Weg-Analyse basieren, muss als erster Schritt die Eingangsgröße, d.h. die Kraft-Weg-Kurve als Basis des gesamten Überwachungsverfahrens aufgenommen werden [49]. Dazu werden entsprechende Sensoren für die Kraft- bzw. Wegmessung benötigt. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

2.6.1 Aufbau des Wegsensors

Zur Aufnahme der Kraft-Weg-Kurve als Basis des Überwachungsverfahrens wird ein Wegsensor benötigt, der den Stempelweg misst. Im Rahmen der Arbeitsuntersuchungen wurde hierfür ein konventioneller induktiver Abstandssensor verwendet. Da der Messbereich des Abstandssensors auf Werte zwischen 0,5 mm und 2 mm beschränkt ist, der Arbeitsweg des Stempels jedoch deutlich darüber liegt, ist der Einsatz eines Richtungswandlers und eines speziellen Sensor-Halters erforderlich. Der Richtungswandler wird als ein keilförmiges Metallstück ausgeführt, dass auf der Stößelführung festmontiert ist. Bewegt sich der Stempel senkrecht nach unten, so wird aufgrund der Form des Richtungswandlers diese Bewegung in eine seitliche Bewegung umgesetzt, die von dem Wegsensor aufgenommen wird. Der Wegsensor besitzt einen Spannungs-Ausgang, der direkt an das Messsystem angeschlossen werden kann. Die genaue Anordnung ist im Bild 2.25 veranschaulicht. Um ein optimales Ergebnis zu erzielen, muss der Wegsensor so geneigt sein, dass seine Arbeitsfläche stets parallel zur schrägen Seite des Richtungswandlers ausgerichtet ist, was durch den Sensorhalter sichergestellt wird. Bei Annahme eines maximalen Arbeitswegs des Stempels von $W = 10 \text{ mm}$ und eines Arbeitsbereichs des Sensors von $s = 1,5 \text{ mm}$, so resultiert ein geeigneter Keilwinkel von $\alpha = \arcsin(s/W) = \arcsin(1,5/10) \approx 9^\circ$.

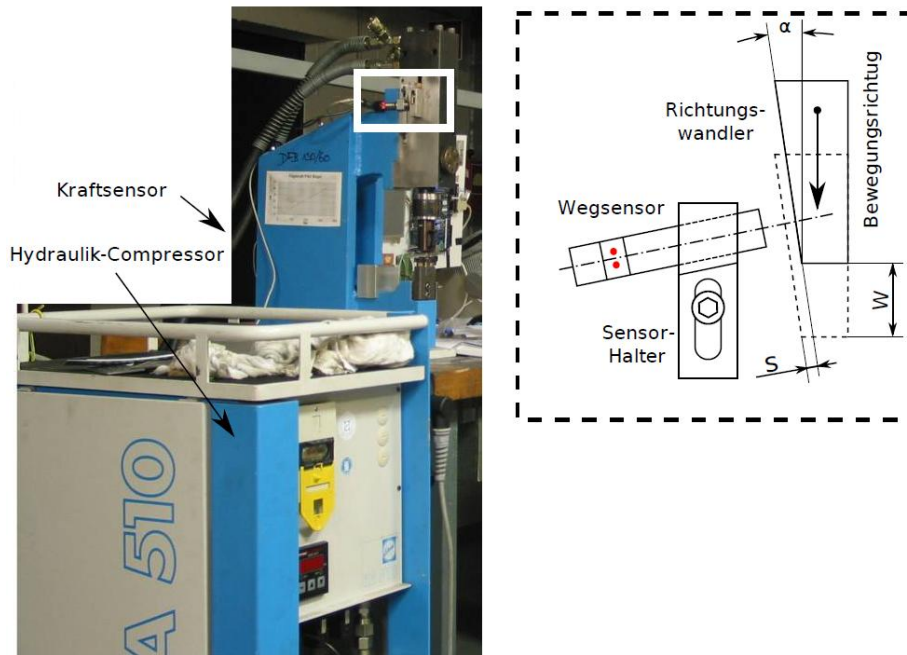


Bild 2.25. Foto des Clinch-Werkzeugs mit Hydraulik, Kraft- und Wegsensoren. Rechts: Prinzipskizze vom Wegsensor-Halter und Richtungswandler zur Umsetzung der Stempelweglänge W in die vom Sensor gemessene Strecke s

2.6.2 Aufbau des Kraftsensors

Für die Qualitätsüberwachung beim Durchsetzfügen ist die zum Bauteil angelegte Fügekraft von besonderem Interesse. Sie kann dabei entweder direkt auf dem Stößelweg gemessen werden oder indirekt durch Aufbiegen des Bügels. Bei der direkten Messung der Fügekraft wird ein piezoelektrischer Kraftsensor im Werkzeughalter installiert [50]. Durch den Sensor wird der Werkzeughalter größer und die Anwendung des Clinchsystems dadurch begrenzt. Bild 2.26 stellt ein Beispiel eines solchen Sensors der Fa. Kistler dar [51].



Bild 2.26. Kalibrierter piezoelektrischer Kraftsensor vom Typ 9031A (Fa. Kistler) für den Messbereich von 0 bis 60 kN

Beim Durchsetzfügen wird durch einen Hydraulikzylinder eine Kraft i.d.R. von bis zu 50 kN ausgeübt. Diese Fügekraft wirkt auf den Stößel, die Bleche, die Matrice und auf den C-Rahmen. Der C-Rahmen wird während des Fügeprozesses kaum vermeidbar elastisch verformt, so dass der gemessene Stempelweg relativ zum Hydraulikzylinder größer ist als der relative Stempelweg für die Ausbildung des Clinchpunktes [37]. Die Ausfederung des C-

Rahmens ist von seiner Geometrie abhängig und kann als eine Feder dargestellt werden. Die Federkonstante eines C-Rahmens liegt im Bereich zwischen 100-150 kN/mm². Bei der indirekten Fügekraftmessung wird die ausgeübte Kraft durch die Verformung des C-Bügels ermittelt, die von der angelegten Kraft unmittelbar abhängig ist [50]. Der Sensor wandelt die Stauchung oder Dehnung an der Oberfläche des Bügels dabei in eine elektrische Größe um. Dabei finden Piezokeramiken und Dehnungsmessstreifen (DMS) im Kraftsensorenaufbau breite Anwendung. Die sogenannten Dehntrafos schließen die Verstärker ein und haben als Ausgangsgröße i.d.R. eine Spannung (z.B. von -10 bis +10 V) oder ein Strom (4-20 mA) verwendet. Bild 2.27 zeigt ein Beispiel eines solchen Sensors der Fa. Baumer [52].



Bild 2.27. Dehntrafos messen die zwischen den Schraubauflagen vorhandene Dehnung

Eine Positionierung des Dehntrafos in ausreichendem Abstand zu kritischen, prozessnahen Bereichen, erfordert eine Kalibrierung des Sensors. Darunter ist eine Zuordnung zwischen dem Ausgangswert des Sensors und der tatsächlich ausgeübten Kraft zu verstehen. Der Kraftwert wird direkt zwischen dem Stempel und der Matrize durch ein zusätzliches kalibriertes System ermittelt. Das berechnete Verhältnis zwischen diesen zwei Werten stellt einen Umwandlungskoeffizienten für einen gegebenen Bügel und Sensor dar. Das Verhältnis kann als proportional angenommen werden, da die Aufbiegung des Bügels im linearen „hookeischen“ Bereich liegt. Der Messbereich des Sensors kann mittels der Finite-Elemente-Methode berechnet werden. Bild 2.28 demonstriert das Spannungsdiagramm für einen C-Rahmen bei Aufbringung einer maximalen Kraft.

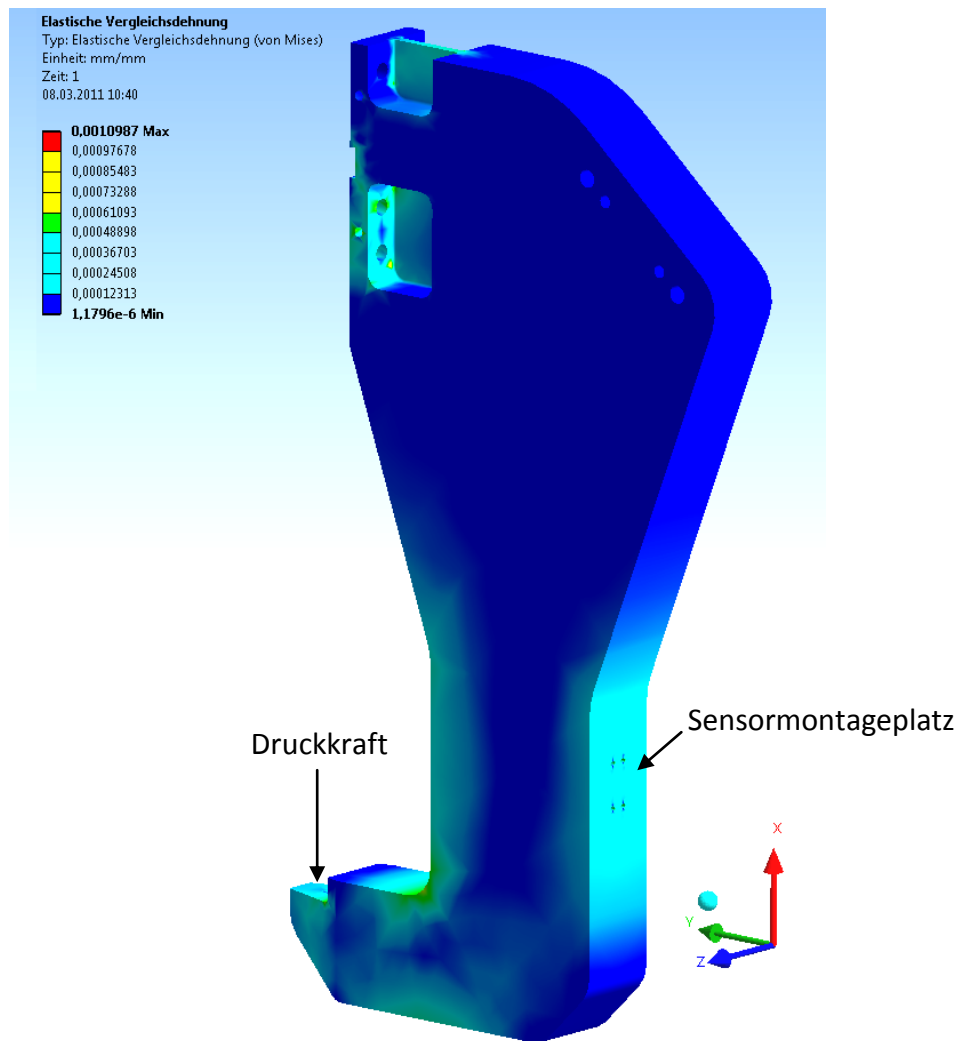


Bild 2.28. Elastische Vergleichsdehnung bei einer Druckkraft von 55 kN. Die Dehnung im Bereich der Sensorposition beträgt ca. 250 $\mu\text{m}/\text{m}$

3 Entwicklung eines Prozessüberwachungssystems

In diesem Kapitel wird das entwickelte Prozessüberwachungssystem dargestellt. Es wird zuerst die Struktur des Online-Überwachungsprozesses erläutert. Danach werden einzelne Bestandteile des Prozesses, z. B. in Form einer Merkmalsextraktion aus einer gemessenen Kraft-Weg-Kurve, genauer betrachtet. Es folgt die Definition eines Klassifikators und die Bestimmung der zugehörigen Klassifikatoren für den Einsatz in der Prozessüberwachung. Zum Schluss erfolgt eine Beschreibung des Klassifizierungsalgorithmus.

3.1 Struktur des Online-Überwachungsprozesses

Das im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Kraft-Weg-Analysekonzept steigert die Empfindlichkeit der Analyse erheblich und ermöglicht es, auch relativ kleine Fehler zu erkennen. Ziel des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens ist es, die Qualität der Fügeverbindung zerstörungsfrei zu analysieren und die auftretenden Fehler zu klassifizieren. Das Verfahren basiert auf einer Analyse der Kraft-Weg-Kurve [53], die anhand von charakteristischen Unterschieden zwischen der Messkurve und der Referenzkurve auf etwaige Fehler schließen lässt. Das Verfahren resultiert aus einer genauen Analyse und Simulation des Metallbearbeitungsprozesses. Bild 3.1 zeigt ein Strukturbild des entwickelten Überwachungsablaufs. Die Arbeiten, die vor dem eigentlichen Überwachungsprozess zu leisten sind, wurden dabei gestrichelt dargestellt.

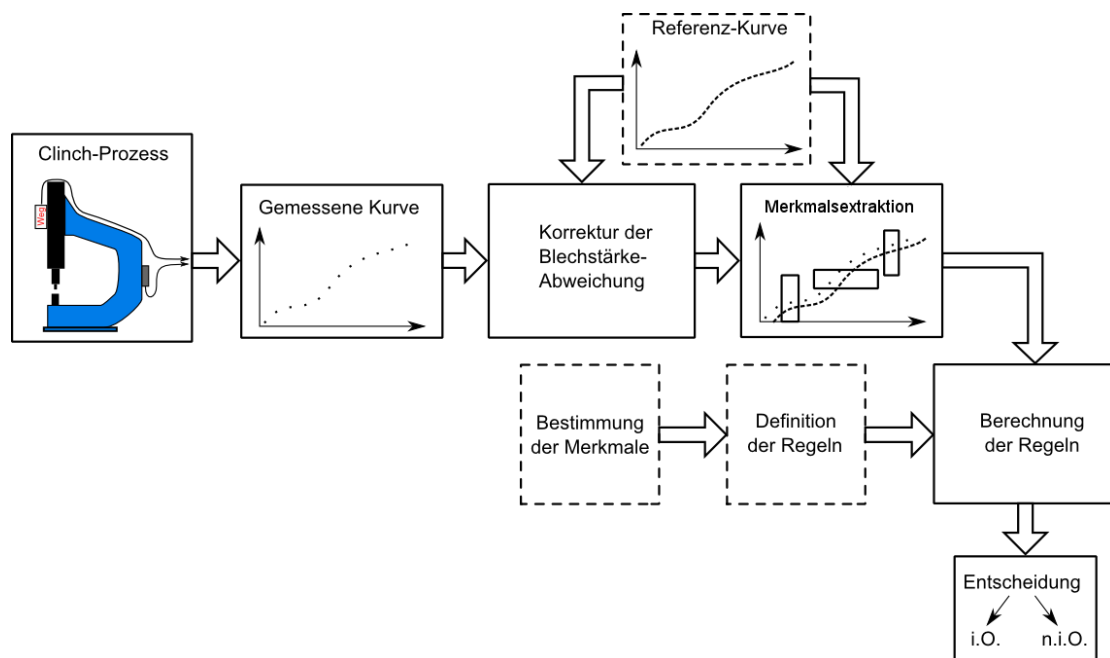


Bild 3.1. Strukturbild des Online-Überwachungsprozesses. Die Operationen in den gestrichelten Blöcken gehören zu der Vorbereitungsphase des Prozesses

Die Eingangsgröße des Systems bzw. die fügeprozessrelevante Information wird mittels Kraft- und Positions-Sensoren ermittelt. Diese zwei Messkurven werden nun als Kraft-Weg-

Kurve hinterlegt. Die Kraft-Weg-Kurve stellt die Eingangsgröße des Systems, kombiniert über die Druckkraft und dem Stempelweg dar. Diese Form der Ermittlung des Kraft-Weg-Verlaufs wird auch in den konventionellen Überwachungssystemen verwendet (siehe Abschnitt 2.5) und weist mehrere verfahrenstechnische Vorteile auf:

- die Sensoren werden weit entfernt vom Werkzeugsatz aufgelegt,
- robuste Technik (DMS oder Piezo),
- anwendbar für verschiedene Fügeverfahren, beispielsweise Stanznieten, usw.

Die ermittelte Kraft-Weg-Kurve wird mit einer Referenzkurve verglichen, welche vorher empirisch ermittelt werden muss und die Merkmale zur weiterfolgenden Analyse werden extrahiert.

Eine wesentliche Neuerung, die die notwendige Breite des Toleranzbereichs reduzieren kann, ist die Befreiung der Messdaten von einer möglichen Blechdickenabweichung. Dieses wird jedoch vor der Merkmalsextraktion durchgeführt. Die Dicke des verwendeten Blechs unterliegt typischerweise Abweichungen vom Normwert, welche in einem definierten begrenzten Toleranzbereich liegen. Diese geringen Abweichungen genügen jedoch schon, um signifikante Auswirkungen auf die Kraft-Weg-Kurve zu haben. Dies führt bei den klassischen Kraft-Weg-Verfahren zu einem verbreiterten Toleranzband bzw. Konfidenzintervall, da die Blechdickenschwankungen einkalkuliert werden müssen. Um diesen Effekt zu vermeiden, wird in dem hier vorgeschlagenen Verfahren die mittlere Blechdickenabweichung geschätzt und aus der Messkurve heraus kalibriert. Der Vergleich der so berechneten Messkurve mit der Referenzkurve liefert schließlich gewisse Parameter, bei denen es sich im Wesentlichen um die mittlere horizontale oder vertikale Kurvenverschiebung an speziell ausgewählten Stellen der Kurven handelt. Mit Hilfe dieser Parameter können Rückschlüsse auf einen aufgetretenen Fehler gezogen werden. Dazu werden ein FE-Modell des Clinchpunktes entwickelt und zahlreiche Messkurven analysiert und für alle wichtigen Fehlertypen jeweils typische charakteristische Eigenschaften in der Kraft-Weg-Kurve extrahiert. Diese Eigenschaften werden im Folgenden als Merkmale bezeichnet und resultieren aus dem Verständnis des physikalischen Prozesses, der dem auftretenden Fehler zugrunde liegt. Die Klassifizierungsfunktion liefert schließlich eine Aussage hinsichtlich einer endgültigen Entscheidung über die Qualität des Clinchpunktes.

Ein deutlicher Vorteil des hier vorgestellten Verfahrens liegt in der intelligenten Messkurvenauswertung, welche sich nicht allein auf die Bestimmung absoluter Abweichungen beschränkt, sondern vielmehr auch die Form bzw. die Steigung des Kurvenverlaufs für die Entscheidung heranzieht. Damit haben zulässige Effekte, wie z.B. Blechfestigkeitsschwankungen, welche sich auf die gesamte Kraft-Weg-Kurve ähnlich auswirken, kaum einen Einfluss auf die Fehlerdetektion und müssen demzufolge auch nicht in einem Toleranzband berücksichtigt werden, was somit eine feinere Fehlererkennung erlaubt. Im Folgenden sollen alle wesentlichen Blöcke des Strukturbilds genauer beschrieben werden.

3.2 Ermittlung der Referenzkurve

Neben der gemessenen Kraft-Weg-Kurve wird für die detaillierte Messkurvenanalyse eine Referenzkurve benötigt, welche einen Muster-Kraft-Weg-Verlauf darstellt. Diese Referenzkurve muss vor dem Überwachungsprozess bei jeder Druckfügeanlage separat ermittelt werden. Kommt es vor, dass während des Einsatzes des Überwachungssystems unterschiedliche Blechwerkstoffkombinationen zusammengefügt werden sollen, so genügt eine einzelne Referenzkurve nicht. In diesem Fall muss für jede Blechwerkstoffkombination eine Referenzkurve zur Verfügung stehen (Bild 3.2).

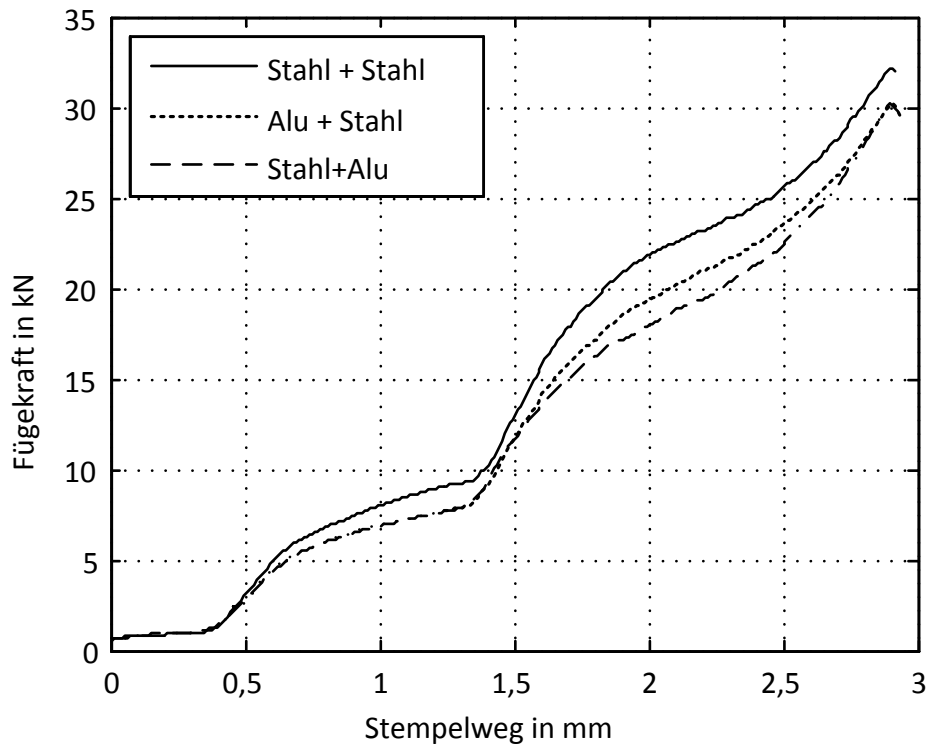


Bild 3.2. Einsatz mehrerer Referenzkurven für verschiedene Werkstoffkombinationen

Die Berechnung der Referenzkurve geschieht durch Mittelung von mehreren gemessenen Kraft-Weg-Kurven, für die ein fehlerfreier Clinchpunkt durch einen Fachmann (Experte) festgestellt wurde. Für den Zweck der Prozessüberwachung wird die Referenzkurve in Form einer Wertetabelle dargestellt. Da der Verlauf von der Kraft-Weg-Kurve während dem Fügeprozess eine streng monoton steigende Funktion ist (vergl. Bild 2.20), sind sowohl die Abbildung der Kraft in Abhängigkeit des Weges $R_f(s_i)$ als auch die Abbildung des Weges in Abhängigkeit der Kraft $R_s(f_i)$ möglich. Dabei wird das Funktionsargument s_i bzw. f_i aus dem Messbereich $[s_0, s_E]$ bzw. $[f_0, f_E]$ als

$$s_i = s_0 + \Delta s \cdot i, \text{ für } i \in \left\{0, 1, \dots, \left\lceil \frac{s_E - s_0}{\Delta s} \right\rceil\right\} \text{ bzw.}$$

$$f_i = f_0 + \Delta f \cdot i, \text{ für } i \in \left\{0, 1, \dots, \left\lceil \frac{f_E - f_0}{\Delta f} \right\rceil\right\}$$

definiert. Die N ausgewählten gemessenen Kraft- und Weg-Kurven werden zuerst nach s_i und f_i mit der Schrittweite Δs bzw. Δf interpoliert. Die interpolierte Kraft-Weg-Kurven werden als $f_k(s_i)$, bzw. $s_k(f_i)$ mit $k = \{1, \dots, N\}$ benannt. Die Referenzkurve ergibt sich durch den Mittelwert aller bereits vermessenen und anschließend interpolierten Kraft-Weg-Kurven zu:

$$R_f(s_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N f_k(s_i),$$

$$R_s(f_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s_k(f_i).$$

Bild 3.3 verdeutlicht die Ermittlung der Referenzkurven.

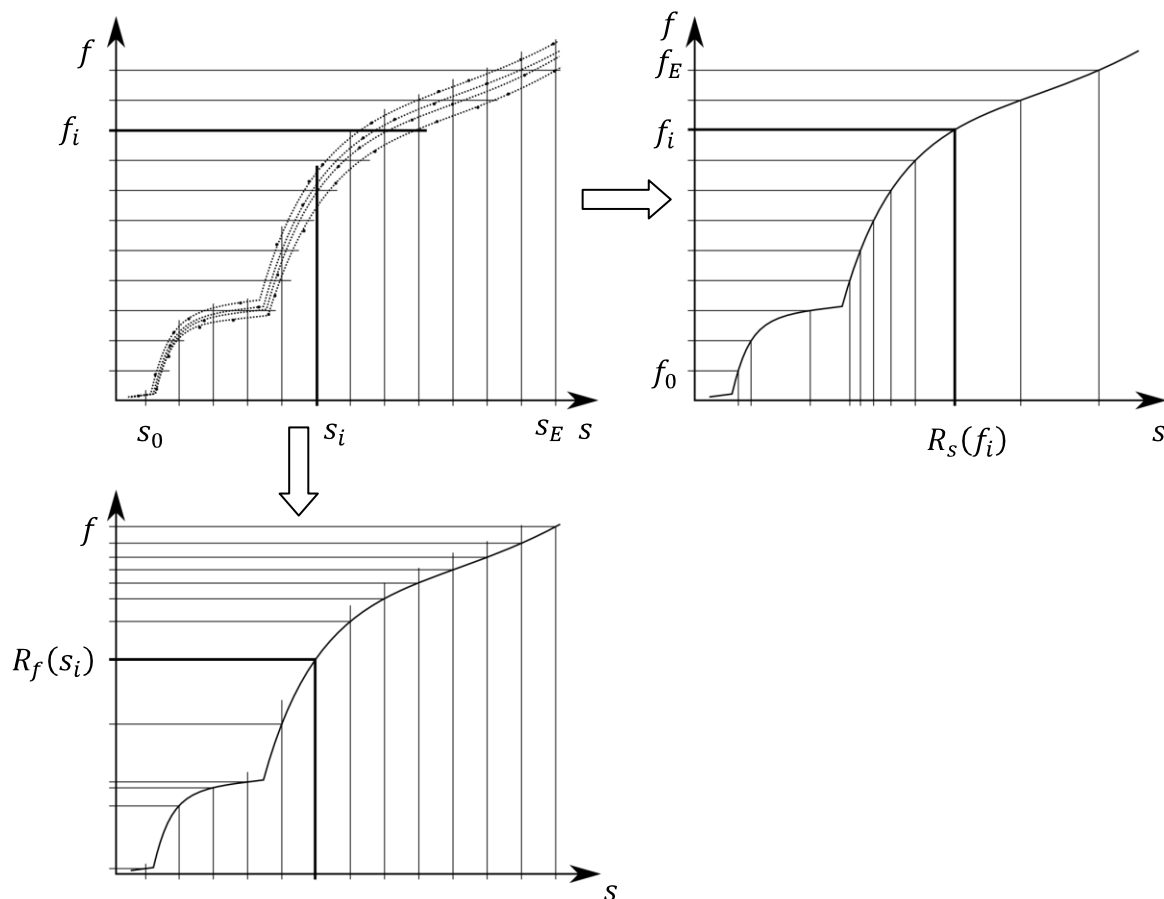


Bild 3.3. Ermittlung der Referenzkurven in Form $R_f(s_i)$ bzw. $R_s(f_i)$ aus den gemessenen Kraft-Weg-Kurven

3.3 Aufgabe der Merkmalsextraktion

Ziel der Merkmalsextraktion ist es, die charakteristischen Abweichungen im Prozessverlauf zu extrahieren. Üblicherweise basiert die Merkmalsextraktion auf einem Vergleich des gemessenen Kraft-Weg-Verlaufs mit einem Muster (siehe Abschnitt 3.2). Der gemessene Kraft-

Weg-Verlauf stellt eine Abbildung des Fügeprozesses in doppelter Menge der abgetasteten Punkte (Messwerte) dar. Die Anzahl der Messwerte liegt in der Regel im Bereich zwischen 200 und 500. Ergebnis der Merkmalsextraktion ist ein Vektor, der dabei aus dem verfügbaren Kraft-Weg-Verlauf signifikante Informationen zur Verfügung stellt, die bei der Fehlererkennung bzw. der Klassifizierung am besten die wesentlichen Änderungen darstellt. Demgemäß übt das Verfahren der Merkmalsextraktion einen unmittelbaren Einfluss auf die Fehlererkennung aus. Wird eine Erkennung der „groben“ Fehler, z.B. Matrizenausbruch, gefordert, so kann eine Hüllkurvenanalyse (siehe Abschnitt 2.5) verwendet werden. Dabei werden Ausschüsse des Kraft-Weg-Verlaufs aus dem Toleranzbereich untersucht. Das Ergebnis der Merkmalsextraktion wird ein skalarer boolescher Wert, der aus der gesamten gemessenen Datenmenge extrahiert wird. Kommen nun mehrere Hüllkurven zum Einsatz, dann können die Ergebnisse als ein Vektor entsprechender Größe von booleschen Elementen dargestellt werden.

Wenn die Erkennung von „kleinen“ Fehlern gefordert wird, dann muss die Merkmalsextraktion auch eine deutlich höhere Genauigkeit aufweisen. Als Maß für die quantitative Beschreibung der charakteristischen Unterschiede wird hier die Verschiebung der Messkurve bezüglich der Referenzkurve herangezogen. Diese Verschiebung wird allerdings nur an explizit ausgewiesenen spezifischen Kurvenstellen berechnet. Dies ist zulässig, da sich die Abweichung der beiden Kurven voneinander im Wesentlichen nur langsam und weitgehend kontinuierlich mit dem Weg verändert und keine größeren Sprünge aufweist. Da die Achsen der Kraft-Weg-Darstellung verschiedene Dimensionen haben, können sinnvollerweise lediglich vertikale und horizontale Verschiebungen betrachtet werden. Eine vertikale Verschiebung relativ zur Referenzkurve bedeutet dabei eine reduzierte bzw. eine erhöhte Kraft für eine bestimmte Stempel-Position. Eine solche vertikale Verschiebung ist meistens mit Änderungen hinsichtlich der Blechfestigkeit und der Druckfläche verbunden. Eine horizontale Verschiebung zeigt hingegen ein früheres oder späteres (im Positions-Sinn) Erreichen eines bestimmten Kraft-Niveaus. Hierbei spielt z.B. die Blechdicke eine maßgebende Rolle.

Für die Berechnung der charakteristischen Verschiebungen werden sogenannte Fenster definiert, welche im Bild 3.4 dargestellt und mit Großbuchstaben gekennzeichnet sind. Ein Fenster ist hierbei stets rechteckig und markiert den Bereich des Diagramms, der für die Berechnung der jeweiligen charakteristischen Verschiebung betrachtet wird.

Es kann festgestellt werden, dass die Fenster so gewählt wurden, dass sie immer ein annähernd gerades Kurvenstück enthalten und nicht auf Biegungen der Kurve liegen. Jedem Fenster ist dabei entweder eine horizontale (Fenster A, B, E, F im Bild 3.4) oder eine vertikale Verschiebung (Fenster C, D, G, H im Bild 3.4) zugeordnet, welche im Folgenden mit dem Symbol Δ gefolgt von dem Fensterkennbuchstaben bezeichnet wird, wie z.B. Δ_A für Fenster A.

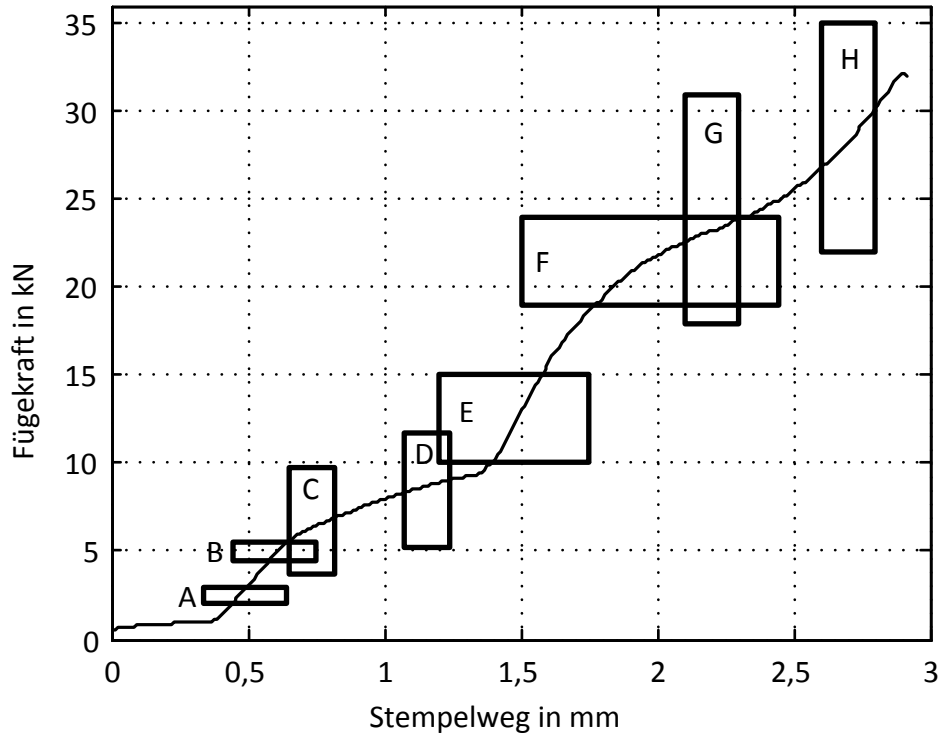


Bild 3.4. Darstellung einer Referenzkurve mit den Fenstern für die Schätzung der Verschiebung

Die Höhe eines Fensters, das zur Bestimmung einer horizontalen Verschiebung dient (z.B. Fenster A), wird einerseits so groß gewählt, dass eine genügend große Anzahl an Messpunkten zur Verschiebungsbestimmung enthalten ist, andererseits aber so klein, dass der betrachtete Teil der Kurve noch relativ gerade ist. Für alle Messkurvenpunkte, die im durch diese Fensterhöhe definierten Wertebereich der Y-Achse (d.h. der Kraft) liegen, ist die horizontale Verschiebung v_s bezüglich der Referenzkurve R_s definiert als:

$$v_s(f_i) = s(f_i) - R_s(f_i).$$

Der arithmetische Mittelwert dieser Verschiebungen wird schließlich dem Fenster zugewiesen und ergibt sich zu:

$$\Delta_X = \frac{1}{N_X} \sum_{f_i \in X} v_s, X \in \{A, B, E, F\},$$

Dabei bezeichnet N_X Anzahl der Interpolationswerte f_i im jeweiligen Bereich. Die Breite des Fensters spielt bei der Berechnung so gut wie keine Rolle. Sie dient lediglich einer groben Eingrenzung des möglichen Verschiebungsbereichs und stellt kein echtes Toleranzband dar. Sie wird so groß gewählt, dass die meisten Kurvenverläufe nur die horizontalen Begrenzungen des Fensters durchlaufen und somit für die Detektion von sehr groben Fehlern verwendet werden kann, wie später noch erläutert wird. Analog zu dieser Beschreibung werden auch die Fenster für die Bestimmung vertikaler Verschiebungen gewählt, wobei allerdings

die Höhe und Breite vertauscht sind, so dass sie im Bild 3.4 als „hochkant“ erscheinen. Hier bestimmt also die Fensterbreite den Wertebereich der X-Achse, d.h. des Weges, für den die mittlere vertikale Verschiebung berechnet wird:

$$v_f(s_i) = f(s_i) - R_f(s_i),$$

$$\Delta_x = \frac{1}{N_x} \sum_{s_i \in X} v_f, X \in \{C, D, G, H\}.$$

Dabei bezeichnet N_x Anzahl der Interpolationswerte s_i im jeweiligen Bereich. Die Position der einzelnen Fenster ist im Übrigen empirisch ermittelt worden und geht aus der Beobachtung des Prozessverlaufs bei verschiedenen simulierten oder modellierten Zuständen hervor.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die für die Fenster berechneten Verschiebungen die Änderungen des Prozesses in Form von wenigen Skalar-Werten darstellen, die im weiteren Überwachungsprozess verwendet werden können.

Die Position dieser Fenster spielt eine maßgebliche Rolle sowohl für die Erkennung eines Fehlers als auch für die Fehlerklassifizierung. Dabei ist die Ermittlung der Position je nach Fügeverfahren (hier: Clinchen, Stanznieten) unterschiedlich und wird in der Regel auf Grundlage der Kenntnis der Experten gelöst. Ein Beweis ist der Zusammenhang zwischen einer Fehlerursache und den zugehörigen Abweichungen in bestimmten Bereichen des Kraft-Weg-Verlaufs; hierbei wurde das in Kapitel 4 beschriebene numerische Modell verwendet.

3.4 Bestimmung der Klassifikatoren

Die Klassifikatoren werden in Form einer Ungleichung für jeden Fehlertyp dargestellt. Bei Verletzung des Klassifikators, wird angenommen, dass ein Fehler vom betrachteten Typ aufgetreten ist. Andernfalls wird dieser Fehlertyp ausgeschlossen. Als Ergebnis der Messkurvenanalyse resultiert demzufolge eine boolesche Aussage über die Fehlerfreiheit: „wahr“ \Rightarrow kein Fehler des betrachteten Typs aufgetreten, „unwahr“ \Rightarrow Fehler vom entsprechenden Typ aufgetreten. Die Bestimmung der Klassifikatoren für die einzelnen Fehlertypen erfolgt durch den Vergleich von vielen gemessenen bzw. simulierten Kurven mit der Referenzkurve. Bei der Wahl eines Klassifikators muss beachtet werden, dass sich die Bereiche auf der Kraft-Weg-Kurve möglichst nicht überschneiden.

Finden beispielweise bei einem Fehler die Abweichungen im Fenster C und D (siehe Bild 3.4) statt und zwar dahingehend, dass im Fenster C die Kraft-Weg-Kurve des fehlerhaften Clinchpunktes unterhalb der Referenz-Kurve und im Fenster D oberhalb dieser liegt, dann kann der Klassifikator als $(\Delta_c - \Delta_D) < S$ beschrieben werden, mit S – Schwellenwert für diesen Fehler. Die Bestimmung des Schwellenwerts basiert auf einer statistischen Analyse von den Abweichungen in entsprechenden Fenstern. Falls die Verteilungsdichten von fehlerfreien und fehlerhaften Clinchpunkten weit entfernt voneinander liegen und sich nicht überlappen, wird der Schwellenwert zwischen den zwei Bereichen angenommen. Wenn das nicht der Fall ist,

müssen entweder die Position der Fenster und entsprechend der Klassifikator selbst optimiert oder es muss ein gewisses Risiko von falscher Fehlererkennung in die Klassifizierung eingefügt werden.

Je nachdem, wie dieser Schwellenwert festgelegt wird, und abhängig davon, wie stark die beiden Verteilungen überlappen, ergeben sich zwei Fehler-Wahrscheinlichkeitswerte α und β , die die jeweilige Wahrscheinlichkeit einer Fehlerklassifizierung angeben:

- Fehler-Wahrscheinlichkeit α :
Eine Clinchverbindung, die eigentlich intakt ist, wird als Fehler erkannt;
- Fehler-Wahrscheinlichkeit β :
Eine Clinchverbindung die einen Fehler hat, wird als intakt erkannt.

Diese Zusammenhänge sind im Bild 3.5 dargestellt:

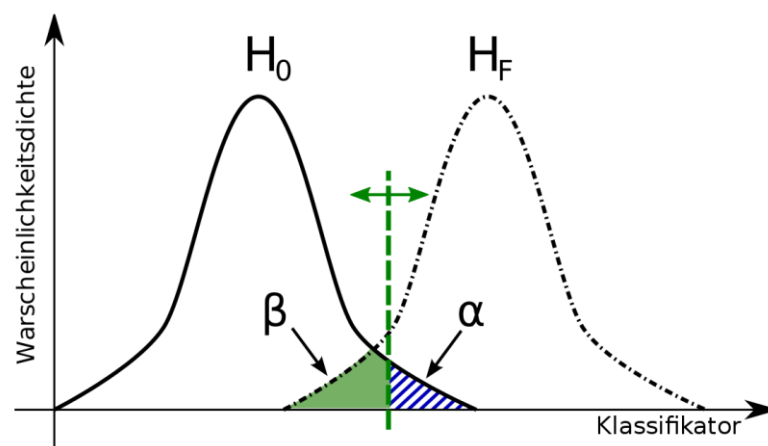


Bild 3.5. Bei der Überschneidung von Wahrscheinlichkeitsdichten muss ein Grenzwert ausgewählt werden, der ein akzeptables Niveau des Fehlerrisikos bestimmt

In Abhängigkeit von der Anforderung an den Prozess muss der Schwellenwert geeignet festgelegt werden, was bei überlappenden Verteilungen nur in Form eines Kompromisses möglich ist. Eine übliche Methode besteht darin, den Schwellenwert so zu wählen, dass die Wahrscheinlichkeitswerte α und β gleich groß sind. Bei Prozessen mit hohen Qualitätsanforderungen – z.B. 6-Sigma-Prozessen – wird der Schwellenwert so gelegt, dass die Wahrscheinlichkeit β nahezu Null beträgt (z.B. 3 Defekte pro Million). Bei nennenswert überlappenden Verteilungen führt dies jedoch zu einem sehr hohen Ausschuss bei einer hohen Fehler-Wahrscheinlichkeit α . Für die oben dargestellten stark überlappenden Verteilungen ist daher primär die erstgenannte Methode (Fehler-Wahrscheinlichkeitswerte α und β gleich groß) sinnvoll anwendbar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Klassifikatoren für alle wichtigen Fehler, die im Betrieb auftreten können, bestimmt. Diese Klassifikatoren werden im folgenden Kapitel näher erläutert.

3.5 Klassifizierung

Als Resultat der Klassifikatoren für die verschiedenen Fehlertypen steht am Ende der Messkurvenanalyse ein Ergebnisvektor, welcher nur „Wahr“- und „Falsch“-Werte enthält. Abhängig vom gewünschten Ergebnis können nun zwei unterschiedliche Klassifizierungsstrategien verfolgt werden.

In den meisten Fällen ist es im Betrieb wichtig, die Qualitäts-Bestätigung in binärer Form, d.h. „in Ordnung“ („i.O.“) bzw. „nicht in Ordnung“ („n.i.O.“), zu erhalten. Bei einem „n.i.O.“ sollte das System so lange anhalten, bis ein Arbeiter eingreifen und das Problem beheben kann. Dieser Fall wird realisiert, indem die einzelnen Ergebnisse der Klassifikatoren mit einer logischen „und“-Funktion verknüpft werden. Ein einziger „Falsch“-Wert im Ergebnisvektor führt dann bereits zu einem „n.i.O“-Ergebnis. Bei einem solchen Verfahren wird von einer Basis-Klassifizierungsmethode mit nur zwei Hypothesen gesprochen. Eine erweiterte Variante ist eine Klassifizierung mit einer Fehler-Typ-Erkennung. Diese liefert im Falle eines fehlerhaften Clinchpunktes auch eine Aussage über den am wahrscheinlichsten aufgetretenen Fehler-Typ. Hier zeigt sich allerdings die Schwierigkeit, dass es zu Überlappungen der Hypothesen (Fehler-Typen) kommt, da sich die verschiedenen Fehler oft auf die gesamte Kurve auswirken, jedoch in der Regel nur anhand eines gewissen Kurvenbereichs detektiert werden. Es kann also passieren, dass lediglich ein einziger Fehler auftritt, jedoch mehrere Fehlertypen detektiert werden. Dennoch grenzt diese Angabe die Fehlerursache ein und erleichtert damit ein Beheben des Fehlers erheblich. Schlägt andererseits z.B. das eigentlich für den aufgetretenen Fehlertyp vorgesehene Merkmal nicht an, so übernimmt dies in manchen Fällen dafür ein anderes Merkmal. Das Überlappen der Hypothesen bewirkt somit auch, dass sich die Wahrscheinlichkeit, dass ein fehlerhafter Clinchpunkt erkannt wird, erhöht. Der umgekehrte Fall, dass tatsächlich mehrere Fehler auftreten, die sich jedoch so auswirken, dass schließlich überhaupt kein Fehler detektiert wird, ist hingegen sehr unwahrscheinlich und kann vernachlässigt werden. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen und Simulationen konnte kein solcher Fall beobachtet werden.

Eine Beschreibung des Systems und insbesondere der Benutzer-Anwendung ist im Anhang zu finden.

3.6 Ermittlung der Blechdickenabweichung

Die Norm DIN EN 10131 [54] definiert die Dicketoleranz für die verwendeten Blechtypen. In Tabelle 3.1 ist ein Teil der gesamten Tabelle aus der Norm dargestellt. Für einen Test-Blechtyp DC04 mit einer Nenndicke von 1 mm wurde eine Untersuchung durchgeführt, die die Abweichungen in der Kraft-Weg-Kurve in Abhängigkeit von der Blechdicke aufgezeigt hat. Dazu wurden aus einer großen Blechplatte an unterschiedlichen Stellen Test-Blechausschnitte entnommen und die jeweilige Blechdicke gemessen. Bild 3.6 zeigt das Ergebnis für 720 Messpunkte in Form eines Histogramms.

Tabelle 3.1. Grenzabmaße der Dicke für Stahlsorten mit einer angegebenen Mindeststreckgrenze von $260 \text{ MPa} \leq R_e < 340 \text{ MPa}$ (Maße in Millimeter)

Nennstärke	Normale Grenzabmaße für eine Nennbreite von		
	≤ 1200	$> 1200 \text{ bis } \leq 1500$	> 1500
$\geq 0,35 \text{ bis } 0,40$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$
$> 0,40 \text{ bis } 0,60$	$\pm 0,04$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$
$> 0,60 \text{ bis } 0,80$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$
$> 0,80 \text{ bis } 1,00$	$\pm 0,06$	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$
$> 1,00 \text{ bis } 1,20$	$\pm 0,07$	$\pm 0,08$	$\pm 0,10$
$> 1,20 \text{ bis } 1,60$	$\pm 0,09$	$\pm 0,11$	$\pm 0,12$
$> 1,60 \text{ bis } 2,00$	$\pm 0,12$	$\pm 0,13$	$\pm 0,14$
$> 2,00 \text{ bis } 2,50$	$\pm 0,14$	$\pm 0,15$	$\pm 0,16$
$> 2,50 \text{ bis } 3,00$	$\pm 0,17$	$\pm 0,18$	$\pm 0,18$

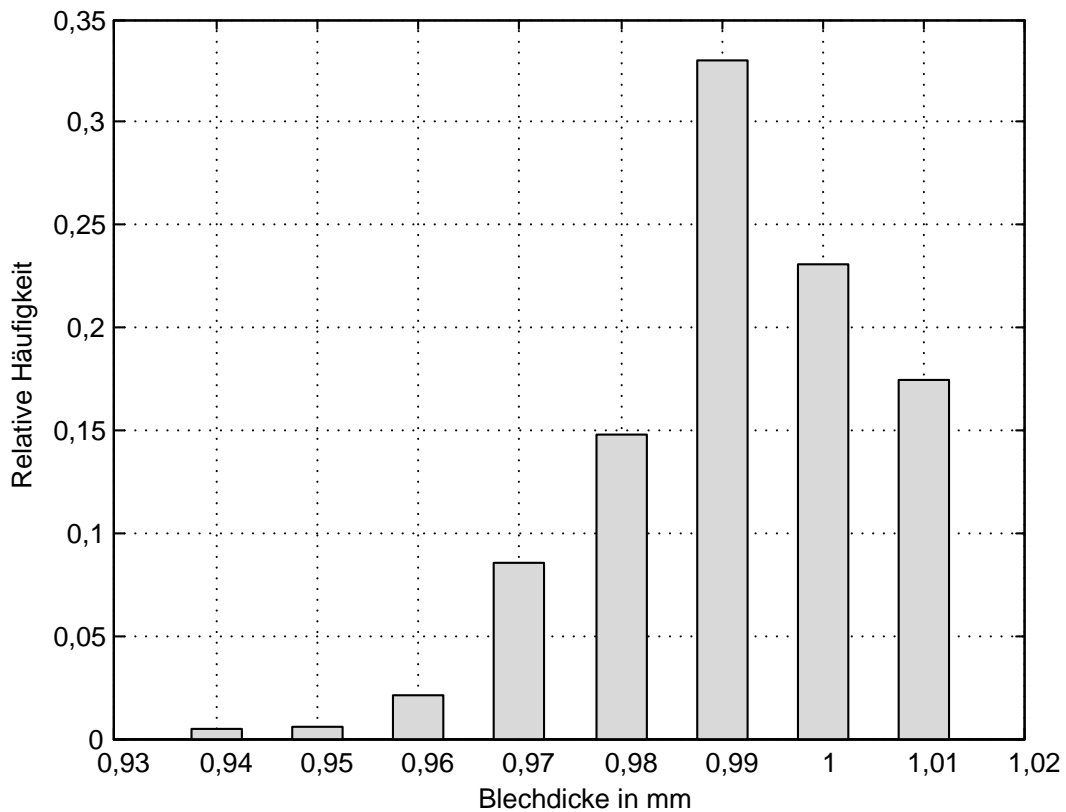


Bild 3.6. Verteilung der Blechdicke für 720 Test-Bleche aus Stahl DC04 mit einer Nennstärke von 1 mm

Für zwei Bleche, die am Clinch-Prozess beteiligt sind, ergibt sich somit eine gesamte Abweichung vom Sollwert von bis zu 0,1 mm bzw. ein Abweichungsbereich AB von 0,2 mm (Bild 3.7). In der Kraft-Weg-Darstellung macht sich eine solche Abweichung vom Normwert durch eine signifikante horizontale Verschiebung der Kurve bemerkbar, so dass der Einfluss dieser zugelassenen Abweichung minimiert werden muss (Bild 3.7). Dies gelingt durch folgende

vereinfachte Betrachtung. Zu Beginn des Clinchvorgangs, d.h. wenn die beiden Bleche bereits zusammengepresst sind und die Durchsetzung des Stempels in das Metall unmittelbar bevorsteht, hängt die absolute Position des Stempels von der gesamten Dicke der beiden Bleche ab. Für diesen Punkt im Kraft-Weg-Diagramm wird die horizontale Verschiebung bezüglich der Referenzkurve bestimmt. Folgt nun der Clinch-Prozess, so kommt es zu einer Phase, in der die beiden Bleche elastisch umgeformt werden. Dieser sogenannte Anfangsbereich ist ca. 0,2 mm lang und zeichnet sich durch einen annähernd konstanten Kraft-Weg-Verlauf aus, d.h. die Kraft und der Weg verhalten sich hier proportional zueinander (z.B.: im Bild 3.4 der Bereich von 0,4 mm bis 0,6 mm). Um eine etwaige Blechdickenabweichung zuverlässig bestimmen zu können, wird ebenfalls am Ende dieses linearen Kurvenverlaufs die horizontale Verschiebung der Kraft-Weg-Kurve bezüglich der Referenzkurve bestimmt. Für die signifikanten Fenster A und B (siehe Bild 3.4) zur Kontrolle der Blechdickenabweichung sind die Verschiebungen Δ_A bzw. Δ_B nach Abschnitt 3.3 definiert. Im Falle eines regulären Prozess-Ablaufs müssen nun beide Verschiebungen Δ_A und Δ_B einen annähernd gleichen Wert aufweisen und dürfen dabei den Toleranzwert der DIN-Norm nicht übersteigen. Besitzen beide ermittelten Verschiebungen ein gleiches Vorzeichen und weisen ähnliche Werte auf, so wird das arithmetische Mittel der Verschiebungswerte als Schätzwert für die Blechdickenabweichung angenommen. Falls die Verschiebungen weit auseinander liegen oder unterschiedliche Vorzeichen ausweisen, was einer abweichenden Steigung der Messkurve entspricht, bedeutet dies, dass der Prozess verändert ist und möglicherweise ein Fehler aufgetreten ist (siehe z.B. „geöffnete Schiebestücke“ in Abschnitt 5.1). Mit diesem Verfahren gelingt es auch, zusätzliche Medien, wie z.B. vergessene Schutzfolien, welche die Gesamtlechdicke wesentlich erhöhen, mit hoher Wahrscheinlichkeit zu detektieren. Um den Einfluss einer Blechdickenabweichung herauszukalibrieren, wird die gemessene Kurve schließlich um den geschätzten Abweichungswert horizontal verschoben. Diese Manipulation bewirkt, dass die gemessene verschobene Kraft-Weg-Kurve und die Referenzkurve zu Beginn des Clinch-Prozesses, d.h. im Anfangsbereich der Kraft-Weg-Kurve, weitestgehend übereinstimmen.

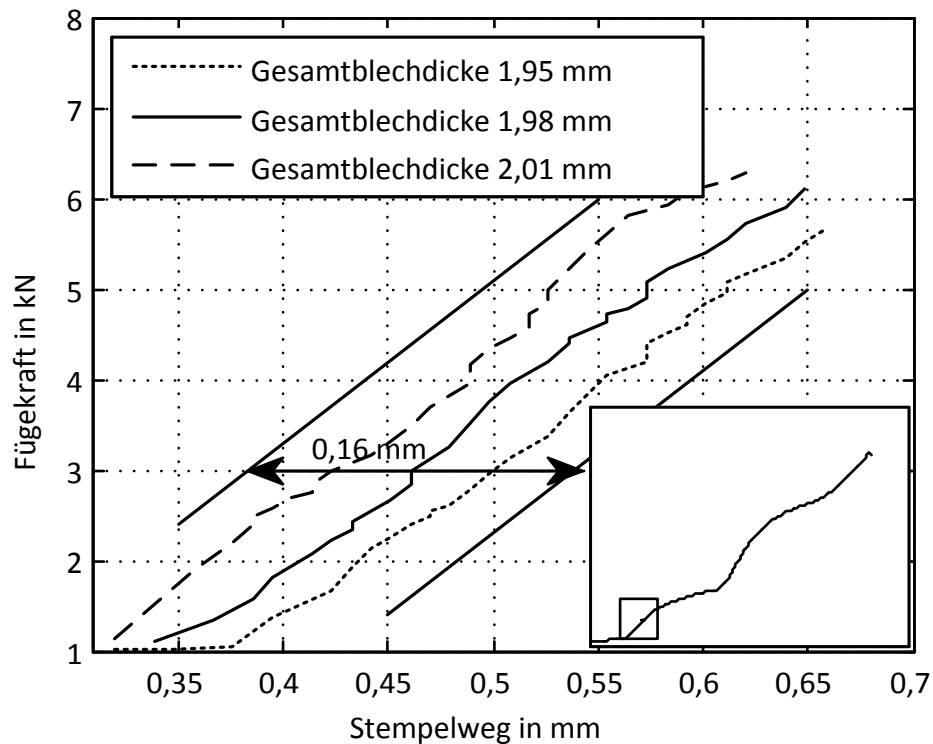


Bild 3.7. Vergleich von Kraft-Weg-Kurven bei drei verschiedenen Blechdicken im Anfangsbereich der Kraft-Weg-Kurve. Die Blechdickenschwankung verursacht eine horizontale Verschiebung im Abweichungsbereich AB

Da beim neu entwickelten Überwachungsverfahren, wie beschrieben, auftretende Blechdickenabweichungen vom Normwert direkt während des Prozesses berücksichtigt werden, müssen diese bei der Bestimmung der Referenzkurve nicht mehr betrachtet werden. Demzufolge müssen lediglich Bleche mit einer Sollblechdicke untersucht werden, so dass für die Erstellung der Referenzkurve eine deutlich geringere Anzahl an Messkurven benötigt wird.

4 Numerische Simulation von Fügeverbindungen

Um die wesentlichen Änderungen in der Kraft-Weg-Kurve des Fügeprozesses zu interpretieren bzw. die Merkmalsextraktion zu begründen, ist es sinnvoll, eine Simulation des Clinchvorgangs durchzuführen. In diesem Kapitel wird die numerische Simulation von Fügeprozessen beschrieben.

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren zur Approximation von kontinuierlichen Bauteilen mittels einer Menge von diskreten Elementen mit einer endlichen Anzahl von Freiheitsgraden. Danach werden Wechselbeziehungen zwischen den einzelnen Elementen aufgenommen [55]. Die breite und vielfältige Anwendung der FEM seit den 50er Jahren ist damit zu erklären, dass das Verfahren relativ leicht physikalisch zu interpretieren und mathematisch zu beschreiben ist. Hinzu kommen steigende Rechnerleistung und eine parallele Berechnung, die den gesamten Entwicklungsprozess optimieren und stark beschleunigen [56].

Derzeit ist die FEM in Mechanik, Fluid-, Elektro-, Thermodynamik und in anderen Bereichen sowie deren Kombinationen weit verbreitet. Auch in der Umformtechnik wird die Simulation oft angewendet [14, 57-59]. Ein Überblick zur FE-Modellierung des Clinch-Verfahrens ist in [60] zu finden. Dabei werden im Prinzip zwei Gebiete unterschieden [42]:

- Simulation der Fügeprozesse,
- Simulation der Beanspruchung von gefügten Bauteilen.

An die Simulation werden dabei je nach Gebiet unterschiedliche Ziele gestellt. Gemäß der Umformtechnik ist die Strukturmechanik von besonderem Interesse, da diese Analyseverfahren die Berechnung von Verformungen, Kräften und inneren Spannungen in Festkörpern liefert [61-64]. So hat Klasfauseweh in seiner Studie eine numerische Simulation der Fügeprozesse eines nichtschneidenden Durchsetzfügeelementes vorgestellt [65]. In dieser werden eine Optimierung von Stempel und Matrize in Abhängigkeit unterschiedlicher Blechwerkstoffe, -dicken und -kombinationen sowie Erhöhung der Tragfähigkeit oder Minimierung der notwendigen Fügekräfte vorgenommen. In einer Untersuchung von Pander wird eine Simulation mit beweglichen Matrizenelementen gezeigt [66]. In [67] ist eine ermüdungsgerechte Analyse für die Fügeverbindung mittels eines FE-Modells dargestellt. Eine vielseitige Untersuchung von Verfahrensgrenzen beim Halbholstanznieten ist in [68] zu finden; eine numerische Optimierung des Clinchverfahrens stellt hierbei das Ziel der Arbeit [69] dar. Eine weitere Studie [70] zeigt eine Simulation der Verformung einer Durchsetzfügeverbindung ohne Schneidanteil unter Scherzugbeanspruchung (Bild 4.1 [70]). Zweck der Simulation war es, eine Festigkeit der Fügeelemente bei Kenntnis maximal übertragbarer Schnittkräfte nachzuweisen. In [71] ist ein spezialisiertes Softwaretool beschrieben, das die numerische Simulation von Clinchprozessen und der Belastung der Verbindung unter Kopfzug durchführt.

Untersuchungen des Clinch-Verfahrens mit der Matrize ohne bewegliche Teile mittels FE-Modellierung sind in [72] und [73] angegeben. Der Fokus der Arbeit von Budde und Klasfau-seweh [74] liegt in der FE-Modellierung und Berechnung der Scherzug-, und Kopfscherzug-Beanspruchung sowie in einer Simulation des Umformprozesses an sich mit der Zielstellung einer Optimierung der geometrischen Parameter: Matrizentiefe, Ambossdurchmesser, Durchmesser und Kantenradius des Stempels. In [75] wird eine Simulation einer Kopfscherzug-Belastung eines Clinchpunktes vorgestellt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Simulationen des kreisförmigen Clinchpunktes durchgeführt und analysiert. Zu diesem Zweck wurde das FEM-Werkzeug Ansys 12.1 der Firma ANSYS, Inc. verwendet [76].

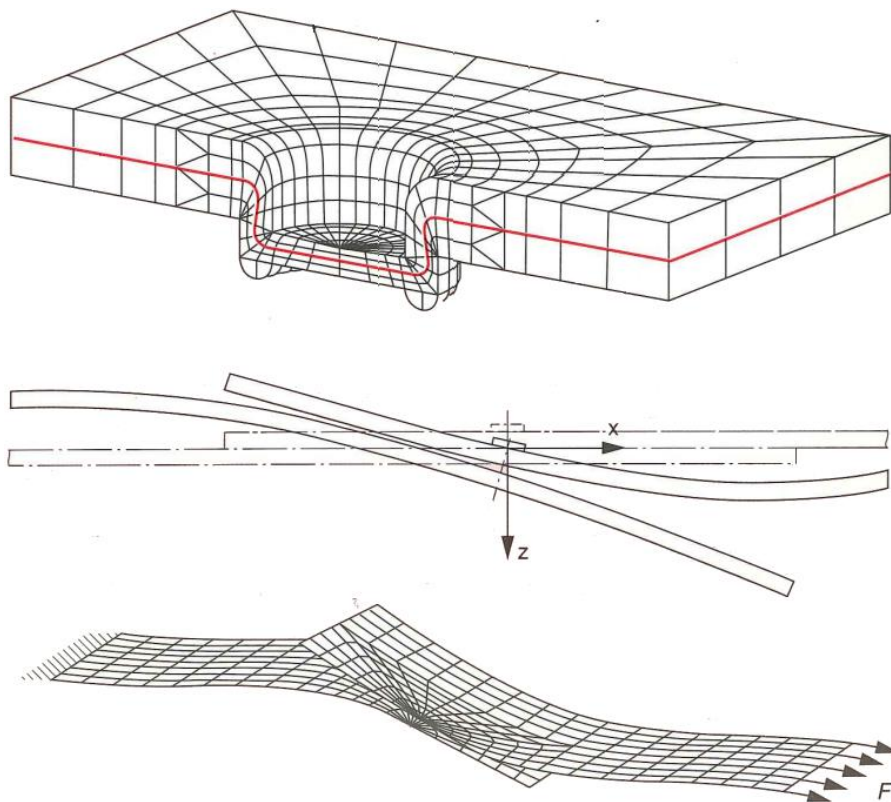


Bild 4.1. Oben: FE-Model zum Abbilden örtlicher Effekte in Durchsetzfugeverbindungen. Mitte: Verformung einer Durchsetzfugeverbindung unter Scherzugbeanspruchung. Unten: Verformtes FE-Model einer Scherzugprobe

4.1 Begriffe und Ablauf der numerischen Simulation

Der klassische Prozess der numerischen Simulation lässt sich allgemein in drei Schritte (Phasen) unterteilen [77]:

- Erstellen des Modells (Preprocessing),
- Numerische Berechnung (Solution),
- Auswertung der Simulationsergebnisse (Postprocessing).

4.1.1 Erstellen des Modells

Das Erstellen des Modells (Preprocessing) erfordert eine längere Entwicklungszeit als die anschließenden weiteren Phasen. Der Preprocessor wird dabei für die Definition der Elementtypen, Materialeigenschaften und der Modellgeometrie verwendet.

Die Elementtypen beschreiben die Freiheitsgrade (Koordinate, thermische, magnetische, elektrische Eigenschaften, usw.). Verschiedene Elementtypen lassen das System mit verschiedener Detaillierung darstellen und die Komplexität des Modells an die Aufgabe anpassen. In ANSYS werden mehr als 150 verschiedene Elementtypen definiert. Jeder Elementtyp hat einen Präfix, der die Kategorie und die eigene Nummer bezeichnet, z.B. der Elementtyp BEAM4 stellt ein Linienelement mit sechs Freiheitsgraden (UX, UY, ZU, ROTX, ROTY, ROTZ) dar und kann somit in 3D modelliert werden. Aus den gesamten 25 Kategorien sind die Kategorien SOLID, COMBIN, CONTACT und TARGET für die Simulation des Durchsetzfügens interessant. Die der Kategorie SOLID zugeordneten Elementtypen sind für die Modellierung von Festkörperstrukturen geeignet. Die Kategorie COMBIN beinhaltet Federelemente. Die Elementtype aus den Kategorien CONTACT und TARGET bilden Paarungen für die Modellierung von Kontakten zwischen Körpern. Die elementspezifischen Eigenschaften werden in sogenannten „real constants“ gespeichert.

Für die meisten Elementtypen (insbesondere für die Kategorie SOLID) ist ein Materialmodell erforderlich. Das Materialmodell beschreibt lineare oder nichtlineare Eigenschaften eines Elements. Sie können konstant, isotropisch, orthotropisch, abhängig oder unabhängig von der Temperatur sein. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stoffes kann dabei beispielsweise in Form einer Tabelle dargestellt werden.

Anschließend wird die Geometrie des Modells definiert. Dafür werden die Knoten mit den Linien verbunden. Durch Linien können Flächen und durch mehrere Flächen Volumina definiert werden (Bild 4.2).

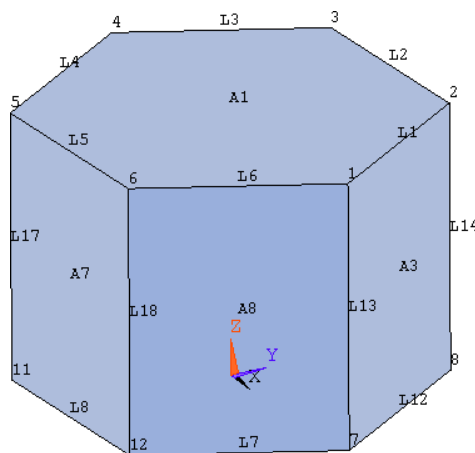


Bild 4.2. Geometrische Körper, z.B. hexagonale Prismen, werden in ANSYS mittels Volumen, Areas (A1 bis A8), Linien (L1 bis L18) und Knoten (1 bis 12) beschrieben

Weitergehend wird die Geometrie mittels Knoten und Elementen vernetzt. Das erstellte Netz aus Knoten beschreibt jetzt das komplette Modell und wird für die weiteren Berechnungen verwendet. Die Größe der Elemente kann dahingehend definiert werden, dass das Modell optimale Eigenschaften in Genauigkeit und der geforderten Rechenleistung aufweist.

4.1.2 Simulationsablauf

In dem Solution-Schritt werden zuerst die Eigenschaften eines Lösungsprogramms, so genannte Solver, definiert. Danach werden die Lasten (Kräfte, Druck, usw.) und die Randbedingungen definiert. Die Randbedingungen fixieren ausgewählte Knoten bzw. definieren die Verschiebungen, die diese Knoten während der Simulation ausüben. Zum Schluss wird der Solver gestartet. Die Dauer der Lösungssuche ist stark vom Modell abhängig und kann sich von einigen Minuten bis zu mehreren Tagen hinziehen.

Der Solver-Algorithmus wird entsprechend vorab verwendeter Elementtypen ausgewählt. Bei einer nichtlinearen Analyse können Konvergenzschwierigkeiten auftauchen. Besondere Aufmerksamkeit beansprucht die Vernetzung des Modells, da eine unzureichende Vernetzung die häufigste Ursache für einen Simulationsabsturz darstellt. Vernetzungen an denjenigen Stellen, die große Umformungen erhalten, können einen Optimierungsbedarf erfordern. Materialbruch, der bei der Simulation von z.B. einem ausgebrochenen Werkzeug vorkommen kann, wird aus der Simulation ausgeschlossen.

4.1.3 Auswertung der Simulationsergebnisse

Die Auswertung der Modellierungsergebnisse erfolgt entweder in Form eines Diagramms für die Knoten als eine Funktion des Transienten (Zeit) oder als Farbverlauf des gesamten Modells zu einem Zeitpunkt. Bei der ersten Variante lässt sich z.B. die Verschiebung oder die Auflagekraft für einen Knoten untersuchen. Bei der zweiten Variante wird z.B. die Verformung des gesamten Systems in der Mitte des Prozesses analysiert.

4.2 Numerisches Modell des Clinchens

4.2.1 Verwendung eines CAD-Modells für eine numerische Simulation

Der Clinchvorgang wird mit Hilfe der FE-Methode analysiert. Die Geometrie eines Clinch-Werkzeuges kann dafür aus einem CAD-Modell erzeugt werden. Als Basis für die Simulation wird eine hydraulische Clincheinrichtung genommen, die im Bild 2.5 zu sehen ist. Hierbei stimmen die Ausführungen auch für pneumatisch-hydraulische oder elektrische Einrichtungen überein. Auch wenn das Geometriemodell in diesem Fall einem Abbild des physikalischen Körpers entspricht, ist es dennoch für eine derartige Analyse in der Regel zu detailliert (Bild 4.3). Das führt zu einer erhöhten Komplexität des Modells (Anzahl der Freiheitsgrade) und hat einen hohen Rechen- und Speicheraufwand zur Folge [77]. Deswegen müssen Vereinfachungen, die jedoch zuverlässige Aussagen über die zu untersuchenden Verformungen erlauben, vorgenommen werden. Eine Vereinfachungsstrategie hängt dabei von dem Simu-

lationszweck ab. Im Folgenden wird ein Modell des Clinch-Werkzeugs für die Simulation der Fügekräfte näher erläutert.

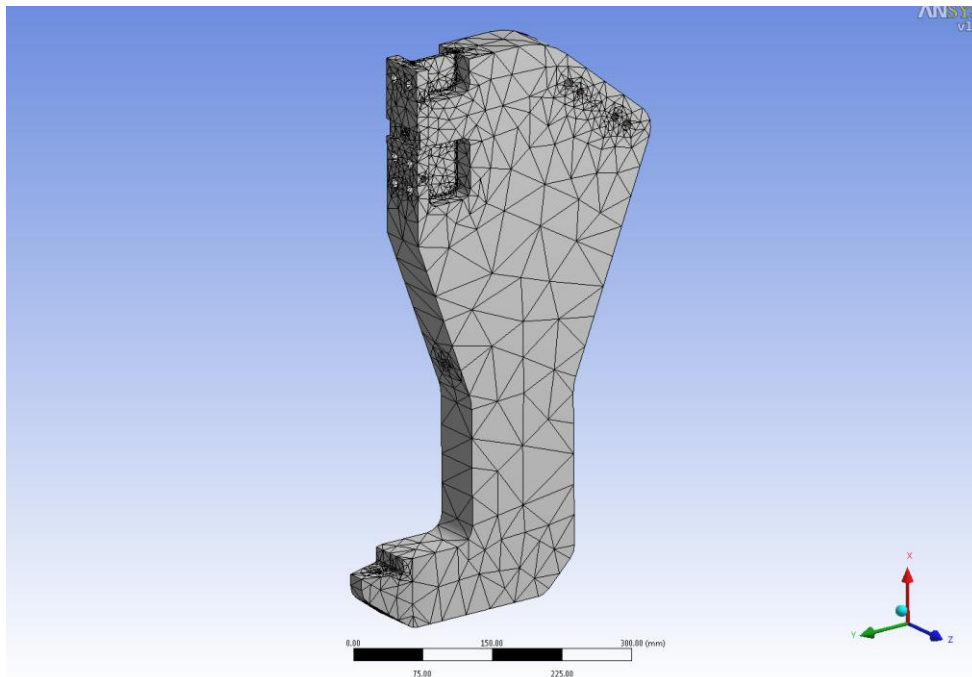


Bild 4.3. 3D-Werkzeug aus CAD und Vollkörper vernetztes FE-Modell des C-Rahmens (ohne Antrieb und Clinchwerkzeug)

4.2.2 Vereinfachung des mechanischen Modells von einer Clincheinrichtung

Bei der Simulation der Fügeverbindung werden die Umformung des Blechs und die Aspekte, die eine signifikante Wirkung aufs Blech ausüben, genau betrachtet. Für die ausgewählten Abweichungen während des Clinchvorgangs (siehe Abschnitt 2.3.5) sind die Clinchwerkzeuge (Stempel und Matrize) mit Werkzeugträger und das Werkstück selbst von Interesse. Bild 4.4 stellt ein solches vereinfachtes Modell der Fügeeinrichtung dar. Der Antrieb wird durch die ausgeübte Fugekraft simuliert. Die Änderung der C-Rahmen-Geometrie ist hier vermeidbar, da die Ausfederung ggf. in die Messergebnisse einkalkuliert werden kann. Der Stößel, der obere Werkzeugträger und der Stempel können in einem Körper zusammengeschlossen werden, da sie vom Aufbau her fest verbunden und den gleichen Kräften und Verschiebungen ausgesetzt sind. Im Folgenden wird diese Gruppe als Stempel bezeichnet. Der Niederhalter verhindert die Bildung von Falten [37] am Blech und ist über eine oder mehrere Federn mit dem Werkzeughalter verbunden. Der untere Teil des Bügels wird als Werkzeugträger mit der Matrize bezeichnet.

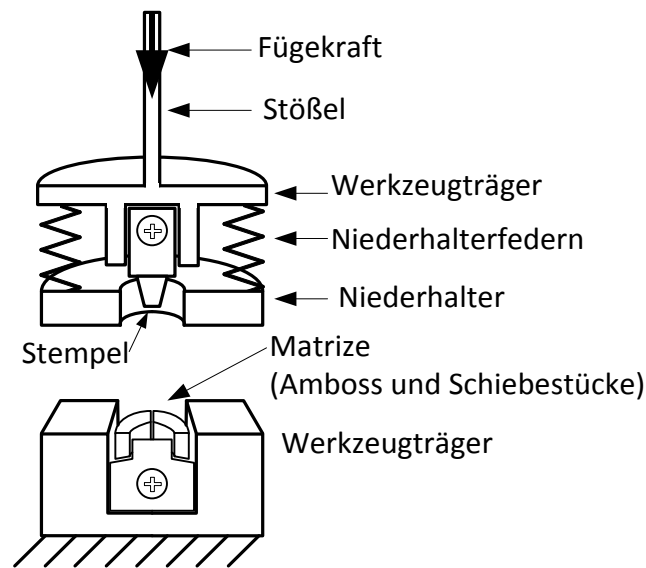


Bild 4.4. Mechanisches Modell der Clicheinrichtung

4.2.3 Symmetrie im Modell des Werkzeugsatzes (Stempel, Matrize, Niederhalter)

Ein Werkzeugsatz besteht aus einem oberen Werkzeugträger, auf dem der Stempel und der Niederhalter befestigt werden, und einem unteren Werkzeugträger mit der Matrize. Für die Modellierung sind nur der Stempel, der Niederhalter und die Matrize relevant, da der Werkzeugträger auf dem Stößel bzw. auf dem C-Bügel fixiert ist. Zur Reduzierung der Anzahl von Elementen müssen die möglichen Symmetriearten untersucht werden. Diese hängen von der Geometrie des Systems und von „Transformationen“, die mit dem Modell durchgeführt werden müssen, ab.

Nach der Vereinfachung (siehe Abschnitt 4.2.2) besteht das Modell aus folgenden Körpern: Stempel mit dem Niederhalter, Matrize als Mehrkörper und Blechkombination. Dabei weisen der Stempel und der Niederhalter sowie die Bleche eine axiale Symmetrie auf, sodass für eine genaue Beschreibung dieses Körpers eine Rotation des 2D-Schnitts ausreichend wäre. Kennzeichnend für die Matrize sind jedoch bewegliche Schiebestücke, die zusammen mit dem Amboss und der Haubenfeder (siehe Bild 2.7) eine Matrize zum Druckfügen bilden. Die Schiebestücke sind nicht kreisrund und die Kontaktfläche mit dem Amboss hat eine Schräge. Deswegen hat die Matrize zwei Symmetrieebenen und mindestens ein 90°-Segment, sodass eine Simulation in 3D durchgeführt werden muss.

Die zu simulierenden Abweichungsfälle (siehe Abschnitt 2.3.5) können auch mit zwei Symmetrieebenen, wie bei der Matrize, dargestellt werden. Demgemäß besteht die minimale Symmetrie des Modells aus zwei Flächen in YZ- und XZ-Ebene. Bild 4.5 stellt das Modell des Werkzeugs (ohne Bleche) dar. In den folgenden Ausführungen wird das Wort „Teil“ bzw. „Segment“ aus Vereinfachungsgründen weggelassen.

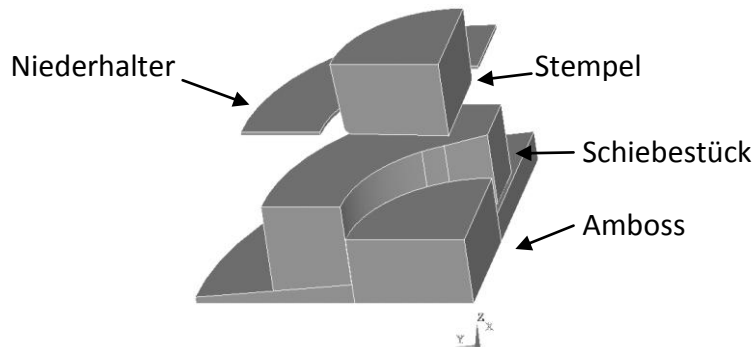


Bild 4.5. 3D-Modell der Körpern eines Clinch-Werkzeugs besteht aus (von oben nach unten) Stempel, Niederhalter und Matrice (Schiebestück und Amboss). ANSYS, Volumen-Ansicht.

4.2.4 Modell des Materials

Im Materialmodell wird üblicherweise ein plastisches Modell verwendet [78]. Die Haupteigenschaften des Materials werden in Form eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms dargestellt, da eine solche Darstellung des Materials von der Geometrie des Körpers unabhängig ist [79]. Auf Basis dieses Diagramms lässt sich die elastische und plastische Verformung des Körpers berechnen. Die passende Genauigkeit des Diagramms spielt dabei für die Simulation eine wesentliche Rolle. Eine vereinfachte Darstellung stellt die Genauigkeit oder auch die Realisierung der Simulation in Frage. Wird das Diagramm zu detailliert, führt es zu einer erhöhten Berechnungszeit. Bei der Auswahl eines passenden Materialmodells werden nur die notwendigen Eigenschaften des Werkstoffs berücksichtigt. Das multilineare „isotropisch hardening“ Modell (MISO) ist für die Simulation von plastischen Verformungen gut geeignet. Das Modell (Bild 4.6) enthält die lineare Approximation (schwarze Linie) des realen Spannungs-Dehnungs-Diagramms (graue Linie). So wird beispielsweise für die vierteilige lineare Approximation zuerst die Elastizität (E -Modul) E des Materials vorgegeben. Diese definiert die Steigung der Hookeschen Geraden (Bild 4.6, Teil 1). Die Streckgrenze R_e legt den Dehnungswert ϵ_e fest, der mit $\epsilon_e = R_e / E$ berechnet werden kann, was die Grenze der elastischen Verformung definiert. Die weiteren zwei Wertepaare beschreiben weitere Kurvenabschnitte bis hin zur Zugfestigkeit R_m . Die abschließende Halbgerade ist immer waagerecht und stellt den Rest des Spannungs-Dehnungs-Diagramms dar. Die Beeinflussung durch Temperaturunterschiede wird bei der Simulation nicht berücksichtigt.

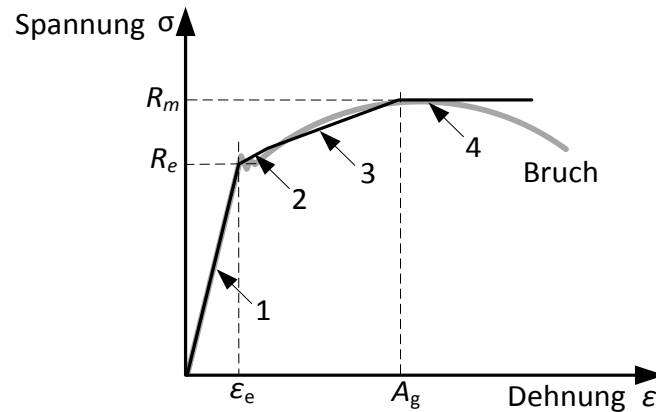


Bild 4.6. Vierteilige lineare Approximation (schwarze Linie, mit Nummern sind die einzelne Teile bezeichnet) des Spannungs-Dehnungs-Diagramms (grau).

Falls der Körper nur die reine elastische Verformung erlaubt, wird das isotropische lineare Modell verwendet. Dessen Spannungs-Dehnungs-Diagramm besteht nur aus einer Hooke-schen Halbgeraden. Die Körper, deren Verformungen für die Mehrkörpersimulationsaufgabe nicht relevant sind, können durch starre Körper modelliert werden. In diesem Fall werden nur diejenigen Elemente, die in Kontakt mit anderen Körpern treten, modelliert. Der Vorteil von starren Körpern im Vergleich zu deformierbaren Elementen ist die rechnerische Effizienz, da die Elemente eines starren Körpers keine internen Kräfte haben, die relative Lage anderer Knoten dieses Körpers während des Simulationsablaufs unverändert zueinander bleibt und die komplette Bewegung durch sechs Freiheitsgrade des Pilotknotens definiert wird. Diese drei Materialmodelle werden im Folgenden bei der Beschreibung des Clinchmodells verwendet.

4.2.5 Multilineares isotropisches Modell der zu fügenden Bleche

Die Bleche beim Fügen unterliegen einer plastischen Umformung höheren Grades. Deswegen ist die Berechnung der Blechumformung der aufwendigste Teil bei der Simulation. Die Auswahl der Simulationseigenschaften stellt einen Kompromiss zwischen dem Rechen- und Speicheraufwand einerseits und der Konvergenz und Zuverlässigkeit der Lösung andererseits dar. Aus Symmetriegründen des Systems (siehe Abschnitt 4.2.3) wird ein 90° Segment der beiden Bleche simuliert (Bild 4.7, oben). Die gesamte Blechfläche wird auf drei Zonen (Ring-sektoren) aufgeteilt. Die Vernetzung wird durch 20-Knoten auf dem Hexaeder-Element SOLID186 mit zusätzlichen Knoten auf den Kanten vorgegeben.

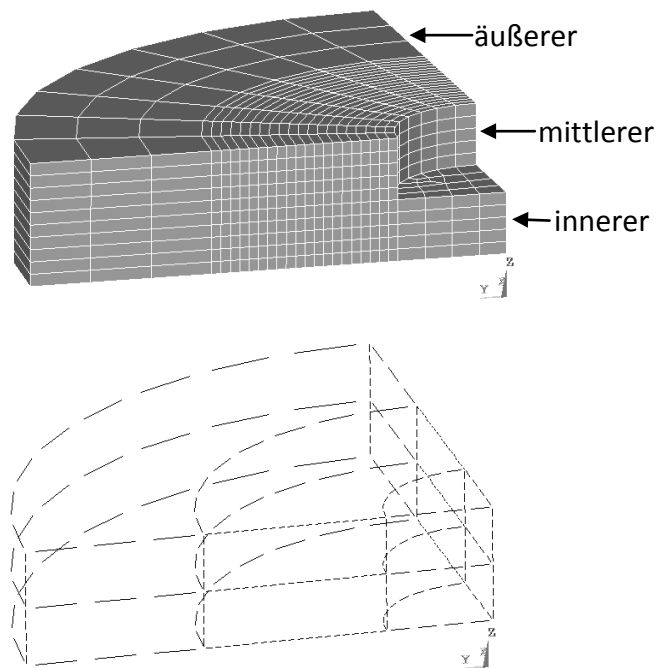


Bild 4.7. Oben: Vernetzte Bleche bestehen aus drei Ringsektoren: innerer (ausgeschnitten aus dem oberen Blech), mittlerer (mit feinen Elementen) und äußerer (mit groben Elementen). Unten: Liniengerüst der Bleche mit Aufteilung.

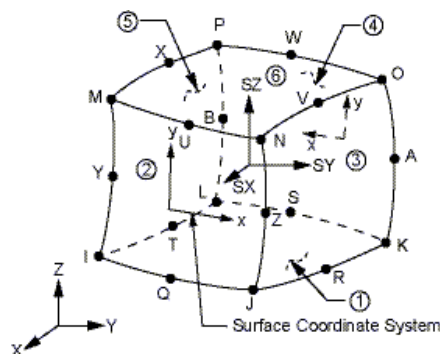


Bild 4.8. SOLID186 – 3D 20-Knoten strukturelles Solid Element

Das Netz wird möglichst radial ausgerichtet. Die kreisförmigen Grenzflächen der Sektoren werden radial auf eine gleiche Anzahl an Elementen aufgeteilt (Bild 4.7, unten). Im inneren Teil erfolgt ein maximales Stauchen und wird durch mittelgroße Elemente abgebildet. Der mittlere Teil unterzieht sich der Einwirkung von Biegekräften und Versetzung und wird durch feine Elemente abgebildet, so dass die Verformung gut approximiert werden kann. Der äußere Teil wird nur wenig verformt und wird durch größere Elemente abgebildet.

Im ganzkörperlichen Modell werden die Elemente auf der Schnittebene durch betragsmäßig gleich große, aber entgegen gerichtete Kräfte beansprucht. Deswegen bleiben diese Elemente während des Fügeprozesses in der Richtung senkrecht zu den Symmetrieebenen unver-schiebbar. Diese Symmetrie wird über die Randbedingungen der Freiheitsgrade der Knoten beschrieben. Die Verschiebung der Knoten, die auf den Schnittebenen liegen, wird in der entsprechenden Richtung blockiert (Bild 4.9).

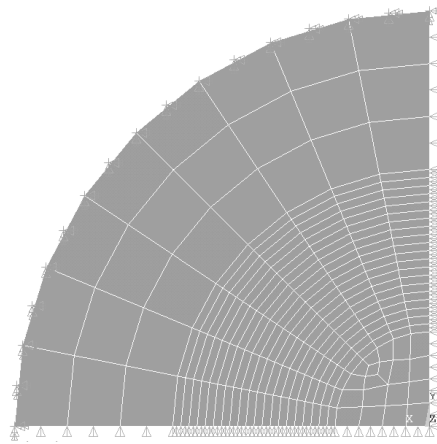


Bild 4.9. Randbedingungen am Schneidrand der Bleche senkrecht zu der Fläche bilden die Symmetrie aus

Wegen der wesentlichen plastischen Verformung sind das Modell der Bleche und ebenfalls das gesamte Modell des Clinchvorgangs nichtlinear. In diesem Fall ist das Material des Blechs mittels eines MISO-Materialmodells zu beschreiben (siehe Abschnitt 4.2.4). Um die Rechneranforderungen zu verringern, wird ein nichtlineares Diagramm durch multilineare Approximation abgebildet (Bild 4.10). Die Werte sind in der Tabelle 4.1 dargestellt.

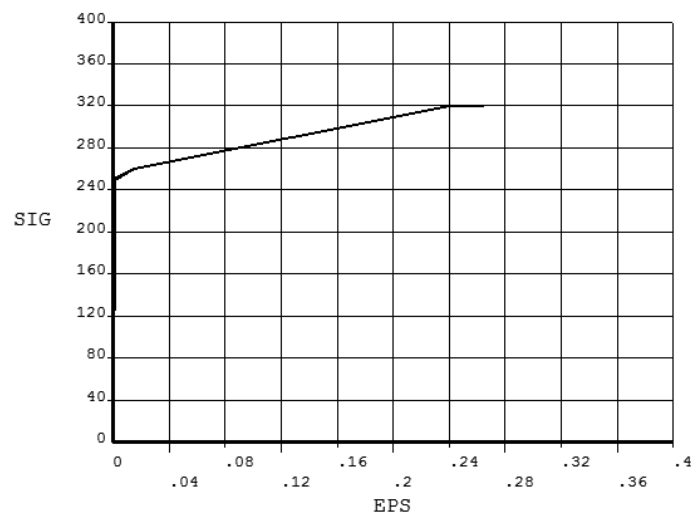


Bild 4.10. Materialmodell des Blechs in ANSYS (Beispiel)

Tabelle 4.1. Werte der multilinearen Approximation des Spannungs-Dehnungs-Diagramms für Blechmaterial (Beispiel)

Parameter	Wert
E	210 kN/mm ²
R_e	250 MPa
R_x	260 MPa @ 0,015
R_m	320 MPa @ 0,24

Bei der Simulation des Clinchvorgangs ist nur der ansteigende Teil der Gesamtkurve interessant, da der Bruchfall nicht zu berücksichtigen ist. Die Anzahl der linearen Bereiche muss sowohl minimal als auch hinreichend für die Simulationszwecke sein. Der erste Teil ($\epsilon < 0,0011905\%$, $\sigma < 250 \text{ MPa}$) stellt eine Hookesche Gerade dar und enthält keine plastische Verformung. Bei der zweiteiligen Approximation (bilineare, BISO) findet die plastische Verformung statt, die aber beim höheren Verformungsgrad keine hinreichenden Ergebnisse liefert (kein Hinterschnitt).

4.2.6 Starre Körper in der Mehrkörpersimulation

Der Stempel, der Niederhalter und der Amboss der Matrize werden als starre Körper definiert. Nur die wirksamen Kontaktoberflächen müssen dabei vernetzt werden, wodurch die Anzahl der Elemente bzw. Knoten wesentlich reduziert wird. Die Pilotknoten werden auf der Z-Achse angeordnet. Über die Randbedingungen werden alle Freiheitsgrade des Pilotknotens der Matrize fixiert. Bild 4.11 stellt den vernetzten Amboss dar.

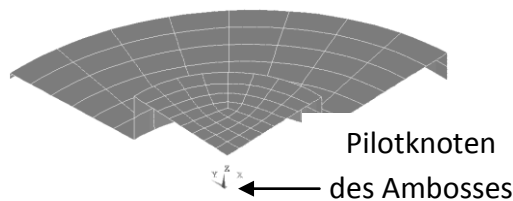


Bild 4.11. Der vernetzte Amboss besteht aus der Kontaktfläche und dem Pilotknoten

Die Simulation des Clinchvorgangs erfolgt durch die Verschiebung des Stempels in die negative Richtung der Z-Achse. Das stimmt überein mit der Bewegung von dem Stößel der hydraulischen Clincheinrichtung bis zu einem Festanschlag. Die weiteren Freiheitsgrade des Pilotknotens des Stempels werden fixiert (Bild 4.12).

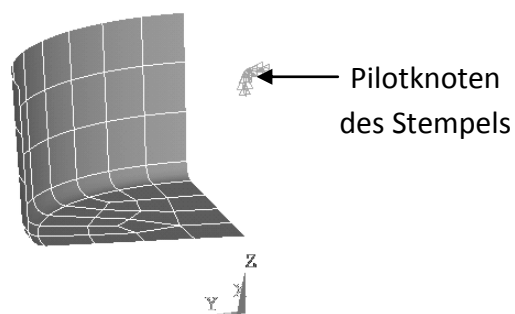


Bild 4.12. Der vernetzte Stempel. Durch den Pilotknoten oben rechts erfolgt die Bewegung des Stempels. Die Pfeile zeigen die Randbedingungen des Stempels

Wie im Bild 4.4 verdeutlicht, ist der Niederhalter mit dem Stempel über eine oder mehrere Federn gekoppelt. Im Modell werden die Pilotknoten des Niederhalters und des Stempels durch ein Federelement gekoppelt, das nur parallel zur Z-Achse wirkt (siehe Abschnitt 4.2.2 oben). Dadurch entsteht bzw. wirkt bei der Verschiebung des Stempels eine Federkraft auf

den Niederhalter. Die Vorspannung der Niederhalterfeder (nach Aufbau des originalen Clinchwerkzeuges) wird auch durch „Realkonstanten“ des Elements berücksichtigt. Alle anderen Freiheitsgrade des Niederhalters sind, wie beim Stempel, blockiert (Bild 4.13).

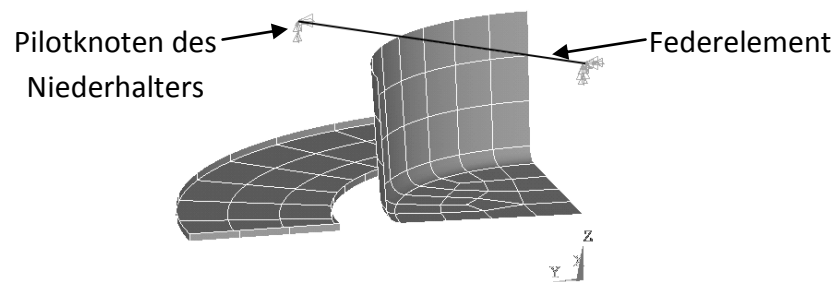


Bild 4.13. Federelement zwischen dem Pilotknoten des Stempels und des Niederhalters

4.2.7 Schiebestück als rein elastischer Körper

Wären die Schiebestücke als starre Körper abgebildet, müsste mit dem Nachteil gerechnet werden, dass sie nicht durch das Fließen des Werkstoffes als „bewegt“ simuliert werden könnten. Deswegen wird die erforderliche Hälfte des Schiebestücks als rein elastischer Körper mit einem entsprechenden E-Modul seines Werkstoffes simuliert. Da das Schiebestück eine unregelmäßige Form hat, wird es durch ein 10-Knoten Tetraeder-Element (Bild 4.14 [80]) mit zusätzlichen Knoten auf den Kanten vernetzt. Die Wirkung der Haubenfeder wird durch ein Federelement simuliert. Ein Ende des Federelements wird auf einem Knoten des Schiebestücks befestigt, ein anderes Ende auf dem zusätzlichen fixierten Knoten (Bild 4.15)

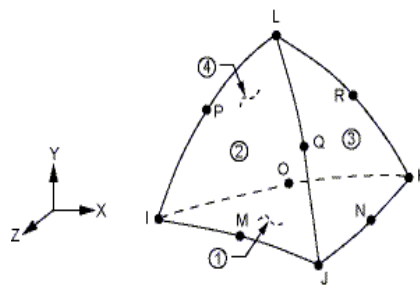


Bild 4.14. SOLID187 – 3D 10-Knoten tetraedrisches strukturelles Solid Element

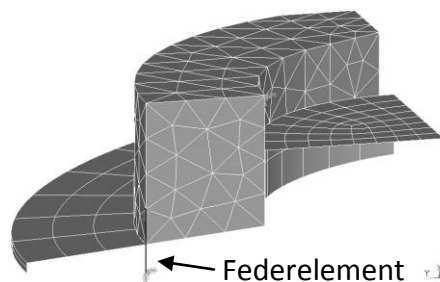


Bild 4.15. Schiebestück als rein elastischer Körper mit einem Federelement, das die Wirkung der Haubenfeder simuliert

Es muss nun die Symmetrie des Werkzeugsatzes ins Modell durch die Grenzbedingungen implementiert werden. Für den Stempel, den Niederhalter und den Amboss erfolgte dies bereits durch die Definition der Freiheitsgrade. Für die Schiebestücke muss die Bewegung der Knoten auf der YZ-Ebene parallel zur X-Achse blockiert sein.

Durch die Randbedingungen wird der Amboss fixiert, so dass während der Simulation keine Bewegung des Körpers durch Verschiebung oder Drehen stattfindet. Für den Stempel ist nur die Bewegung in die negative Richtung der Z-Achse erlaubt. Die Knoten des Schiebestücks, die auf der ZY-Ebene liegen, sind aufgrund der Symmetrie für die Bewegung parallel zur X-Achse gesperrt. Das „Öffnen“ des Schiebestücks wird während des Fügeprozesses durch die Kontaktkräfte des umgeformten Blechwerkstoffs in Y- und Z-Richtung verursacht.

4.2.8 Modellierung der Kontaktflächen

Bei der Simulation eines Mehrkörpersystems wird die Zusammenwirkung der Einzelkörper über die Kontakte bzw. Kontaktpaarungen (Kontaktpartner) beschrieben. Ein Kontaktpaar besteht aus den sogenannten „Target“- und „Contact“-Knoten. Identische Knoten eines Körpers können sich dabei an verschiedenen Kontaktpaarungen beteiligen. Aus den vielfältigen Kontakt-Kombinationen, wie z.B. Knoten-Knoten, Knoten-Fläche, usw. werden in diesem Modell die Knoten der Körperflächen verwendet, d.h. es besteht ein Fläche-Fläche Kontaktmodell. Als „Target“ wird entweder ein starrer oder nur wenig verformbarer Körper genommen. Für die Beschreibung der Reibung wird das Coulombsche Reibmodell [68] verwendet. Die Kontaktflächen und deren Eigenschaften, die im Modell des Clinchvorgangs verwendet werden, sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst.

Tabelle 4.2. Liste der Kontaktflächen

Target	Contact
Stempel (starr)	Oberes Blech
Amboss (starr)	Unteres Blech
Amboss (starr)	Schiebestück
Obere Blech	Unteres Blech
Niederhalter (starr)	Oberes Blech
Schiebestück	Unteres Blech

4.3 Ablauf und Ermittlung des Kraft-Weg-Verlaufs aus der Simulation

Bei der Simulation des Clinchvorgangs sind die Positionen des Knotens (Verformung) und die entstehenden Kräfte von Interesse. Dabei wird die Einwirkung von unterschiedlichen Eigenschaften des Systems, wie z.B. Geometrie des Werkzeugsatzes, Materialeigenschaften des Blechs oder auftretende Fehler, auf den Kraft-Weg-Verlauf untersucht. Während der Simulation werden verschiedene Parameter jedes Knotens (jedes Elements) ausgewertet. Die Simulation besteht aus der Bewegung des Stempels in die negative Richtung der Z-Achse, bis die bestimmte Restbodendicke erreicht wird. Im Bild 4.16, in der die umgeformten Bleche dargestellt werden, ist eine mögliche Form der visuellen Darstellung der Ergebnisse zu sehen. Die Färbung entspricht der plastischen Spannung von Mises [81].

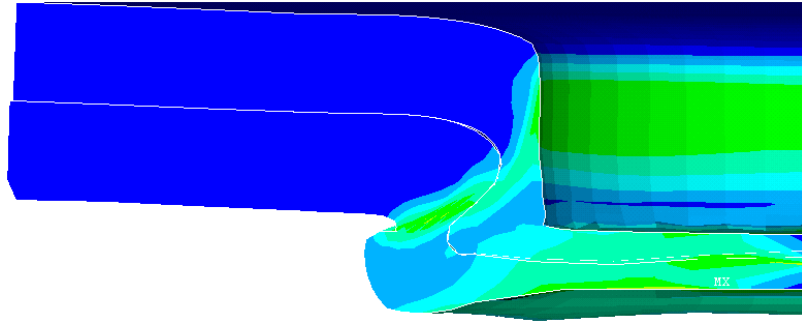


Bild 4.16. Plastische Verformung eines Clinchpunktes (Simulationsergebnisse in ANSYS). Ein Viertel des Clinchpunktes ist angezeigt

Die Simulationsergebnisse lassen unter anderem die Reaktionskräfte und Verschiebungen für einen bestimmten Knoten ermitteln, die beim Clinchvorgang entstehen. Eine geeignete Auswahl für die Ermittlung der Fügekraft kann der Pilotknoten des Stempels sein (siehe Abschnitt 4.2.3 oben). Die Z-Komponenten der Reaktionskraft und der Verschiebung bilden einen Kraft-Weg-Verlauf, der im Bild 4.17 zu sehen ist.

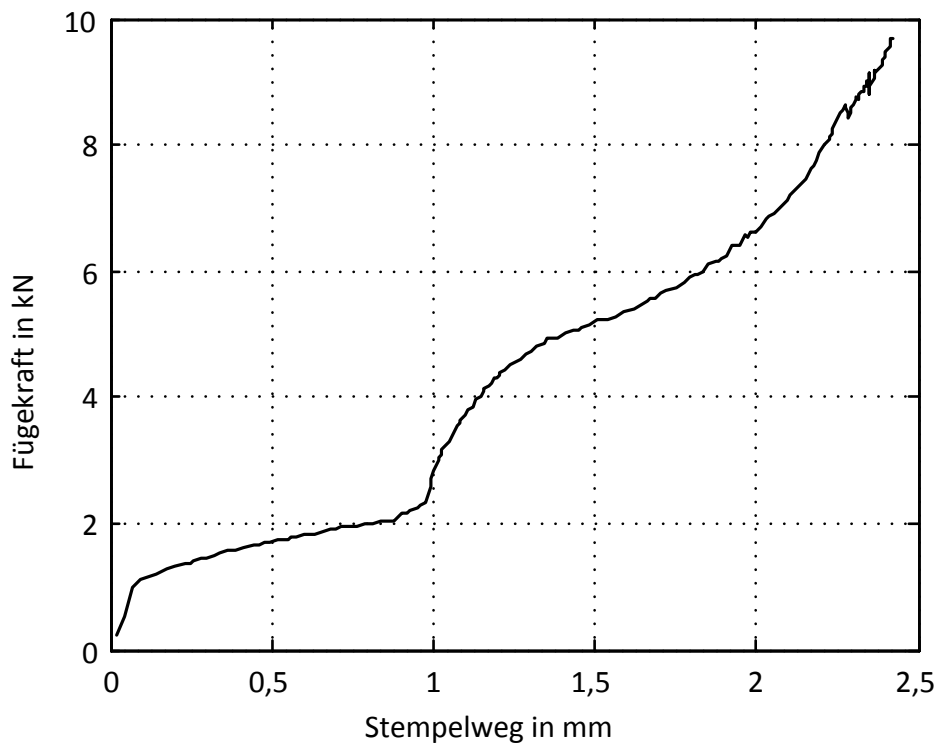


Bild 4.17. Zusammenhang zwischen der Reaktionskraft und der Verschiebung von dem Pilotknoten des Stempels bildet den simulierten Kraft-Weg-Verlauf

4.4 Vergleich einer simulierten und einer gemessenen Kraft-Weg-Kurve für den fehlerfreien Clinchpunkt

Die Verifikation der Simulationsergebnisse wird anhand eines Vergleichs der gemessenen mit den simulierten Kraft-Weg-Kurven durchgeführt. Davor muss jedoch zunächst der simulierte Ablauf skaliert werden. Zuerst müssen die Kraft-Werte mit dem Faktor vier multipliziert werden, da im Modell nur ein Viertel des kompletten Clinchpunktes berechnet wurde. Zusätzlich wird eine Verschiebung addiert, die die folgenden zwei Kräfte

- die Vorspannungskraft der Niederhalterfeder,
- die Kraft, die zur Spannung des Werkstücks bevor der Stempel in Kontakt mit dem Blech kommt,

berücksichtigt. Der zweite Fall wird ebenfalls zum simulierten Stempelweg addiert.

Bild 4.18 stellt den Vergleich von Kraft-Weg-Kurven zwischen Messung und Simulation dar. Die Abweichungen zwischen den Kurven werden durch Streuung der Zugfestigkeit des Metalls beim Herstellen sowie bei einer lokalen Erwärmung während des Clinchprozesses verursacht. Die Linearisierung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms (siehe Abschnitt 4.2.5) übt einen zusätzlichen Einfluss auf die Genauigkeit des Simulationsergebnisses aus.

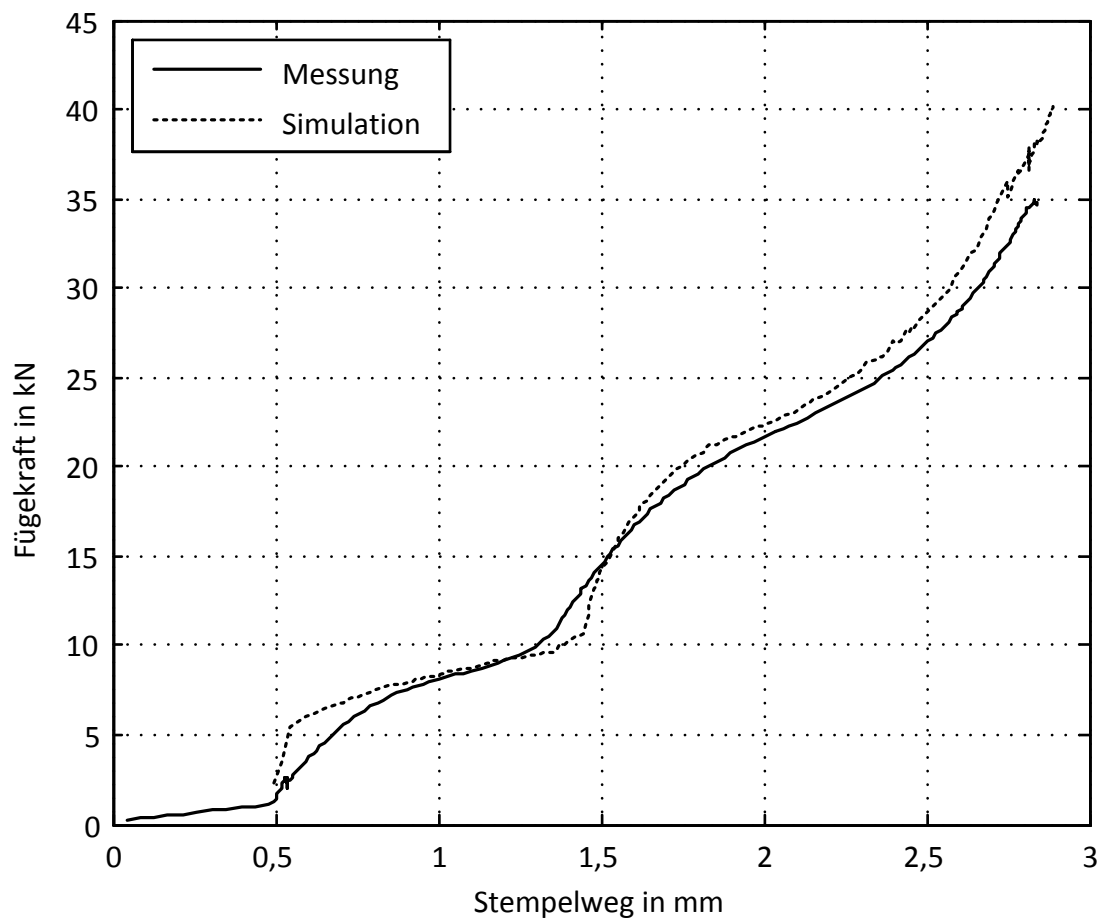


Bild 4.18. Vergleich von simulierten und gemessenen Kraft-Weg-Kurven

5 Simulationsunterstützte Fehlererkennung

Die Erfahrung von Herstellern der Clinch-Einrichtungen zeigt, dass beim Durchsetzfügen die folgenden Fehler-Typen (siehe Abschnitt 2.3) in der Praxis am häufigsten auftreten können:

- geöffnete Schiebestücke,
- verschlissener Stempel,
- falscher Stempel-, Matrizen-Typ,
- ausgebrochener Stempel oder Matrize,
- falsche Blechpaarung (Blechdicke, Reihenfolge, Materialeigenschaften).

Die Geometrieänderungen werden durch die Parametrierung des Modells eingesetzt. Die Materialeigenschaften können durch das Spannung-Dehnungs-Diagramm des Materials geändert werden.

5.1 Geöffnete Schiebestücke

Während des Arbeitsprozesses kann es passieren, dass die Schiebestücke sich nicht vollständig schließen bzw. beim Beginn eines neuen Clinchpunktes ein oder sogar beide Schiebestücke noch etwas geöffnet sind. Dies verändert die Kraft-Weg-Kurve und die Qualität des Clinchpunktes. Bei Betrachtung des Querschnittes (Bild 5.1, links) verändern geöffnete Schiebestücke den Abstand D zwischen dem Druckpunkt und dem Lager, d.h. dem Schiebestück. Es zeigt sich, dass gerade im Anfangsbereich der Kraft-Weg-Kurve die Kurve umso flachere ansteigt, je größer der Lagerabstand D vom Druckpunkt ist. Es wird in diesem Anfangsbereich ein bestimmter Kraftwert bei weiter auseinander stehenden Schiebestücken erst nach einem längeren Stempelweg erreicht.

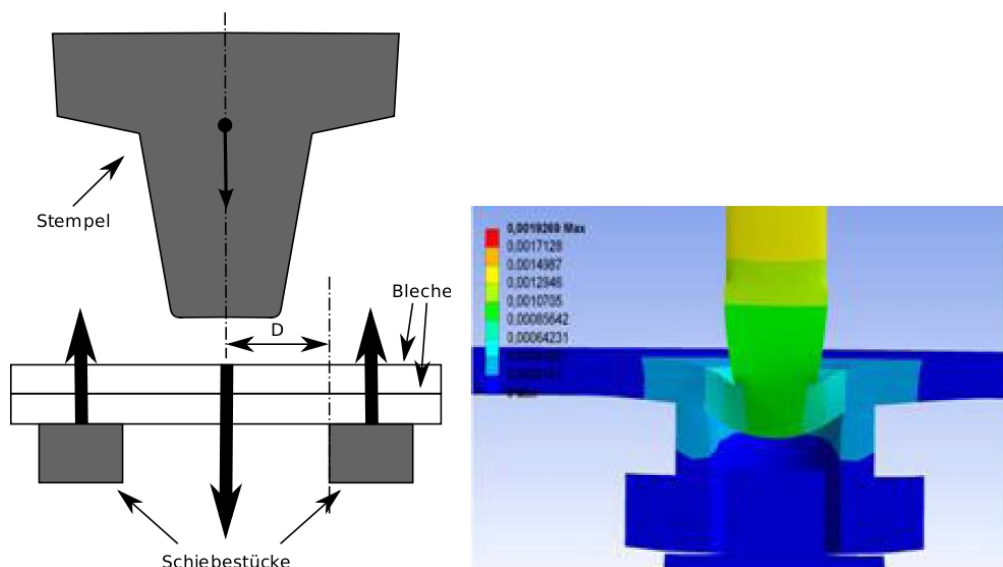


Bild 5.1. Physikalisches Modell der "geöffneten Schiebestücke" (links) und Simulation des Fehlers "geöffnete Schiebestücke" mit ANSYS (rechts)

Eine 2D-Simulation mit ANSYS (Bild 5.1, rechts) zeigt, dass die Metallplatten in der Anfangsphase, d.h. vor dem Aufsetzen auf der Matrize, für auseinander stehende Schiebestücke tatsächlich stärker verformt werden und die Abhängigkeit zwischen dem Stempelweg und dem Schiebestückabstand D für eine bestimmte Kraft in grober Näherung linear ist (Bild 5.2).

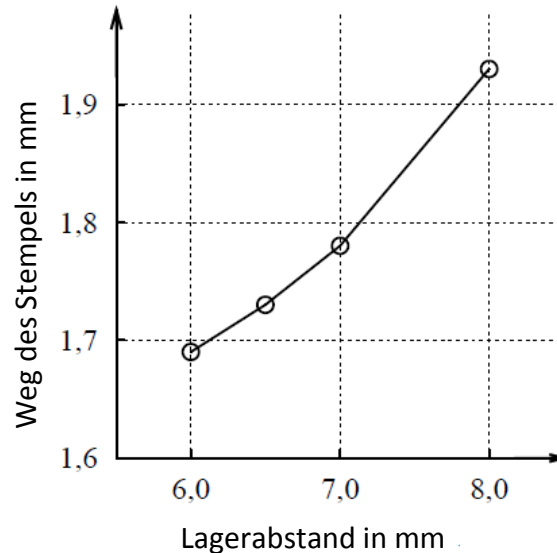


Bild 5.2. Weg des Clinchstempels über der Öffnung der Schiebestücke (Lagerabstand D) bis ein bestimmter Kraftwert erreicht wird (Simulation ANSYS)

In der 3D-Simulation wird der Fehler durch die Verschiebung der Schiebestücklage in die positive Richtung der Y-Achse modelliert (Bild 5.3). Wegen der Amboss-Schräge sinkt das Schiebestück ein wenig in die negative Richtung der Z-Achse. Damit wird die Position der Bleche und des Stempels auch entsprechend angepasst, so dass ein Kontakt zwischen den Flächen bestehen bleibt.

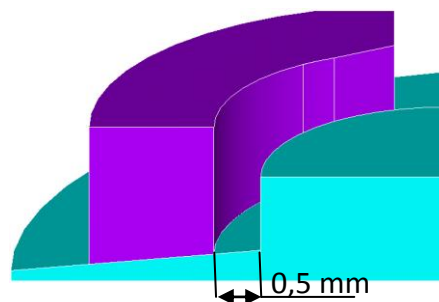


Bild 5.3. Amboss und um 0,5 mm verschobenes Schiebestück

Als Merkmal wird der Betrag der Differenz zwischen den berechneten Verschiebungen am Anfang der Kurve in den Fenstern A und B (siehe Bild 3.4) gewählt. Für den Fehler „geöffnete Schiebestücke“ ergibt sich dann der folgende Klassifikator: $|\Delta_A - \Delta_B| < S_{GS}$. Durch S_{GS} wird ein Schwellenwert für den Fehler „geöffnete Schiebestücke“ bezeichnet. Ist die Differenz der Verschiebungen Δ_A und Δ_B also kleiner als eine zulässige Abweichung S_{GS} , so liegt kein entsprechender Fehler vor. Die Größe des Fehlers wird dabei durch die Neigung der Kurve im A-B Bereich bezüglich der Referenzkurve charakterisiert (Bild 5.5). Die zu wählende Grenze S_{GS}

legt somit die Sensibilität des Überwachungssystems bezüglich des Fehlers fest. Bei der Wahl von S_{GS} , d.h. der gerade noch zulässigen Abweichung, müssen mehrere Parameter berücksichtigt werden, wie etwa Störungen, Abweichungen der Festigkeit, Oberflächenzustand usw. Daher ist S_{GS} im Allgemeinen durch eine Auswertung entsprechender fehlerhafter Kraft-Weg-Kurven experimentell zu bestimmen. Ein entsprechendes Histogramm der auftretenden Merkmalswerte der geöffneten Schiebestücke zeigt Bild 5.6 zusammen mit einem entsprechenden Histogramm für die fehlerfreien Clinchpunkte, mit denen bereits die Referenzkurve bestimmt wurde. Die im Bild 5.6 betrachtete Öffnung der Schiebestücke betrug 0,5 mm. Ab einer solchen Öffnung muss der Clinchpunkt demzufolge als fehlerhaft angesehen werden. Größere Öffnungen bewirken ein Verschieben der Werte nach rechts, d.h. führen zu größeren Merkmalswerten.

Wie deutlich zu erkennen ist, findet nur eine geringfügige Überlappung statt. Dennoch muss bei der Festlegung der Grenze S_{GS} ein Kompromiss zwischen einerseits einer weitgehend vollkommenen Fehlerdetektion und dafür hohem Ausschuss (d.h. fehlerfreie Stücke werden falsch detektiert) oder aber einem geringerem Ausschuss und einer höheren Fehlerquote andererseits gefunden werden. Wird das eine Extrem (sehr niedrige Fehler-Wahrscheinlichkeit β) erreicht, indem die Grenze auf das linke Ende des Histogramms der fehlerhaften Clinchpunkte gelegt wird, so wird ein minimaler Ausschuss (sehr niedrige Fehler-Wahrscheinlichkeit α) erzielt, wenn für S_{GS} die rechte Berandung des Histogramms der Referenzkurve gewählt wird. Der zu schließende Kompromiss hängt nicht zuletzt auch von den Zielen des Betreibers und den Anforderungen an die Clinchpunkte ab.

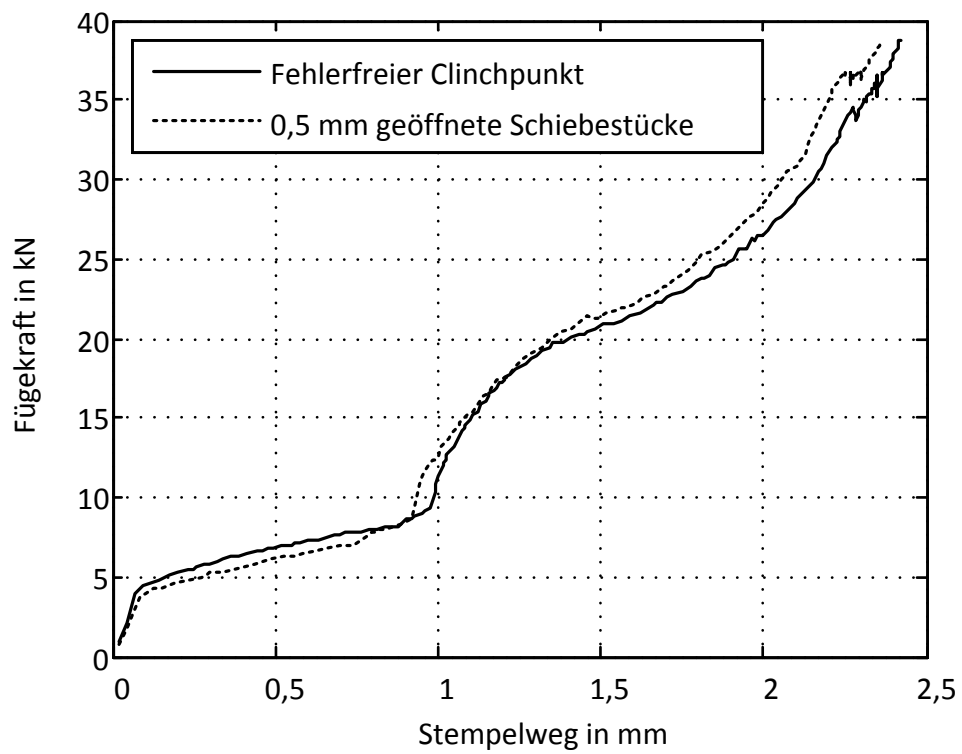


Bild 5.4. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „geöffnete Schiebestücke“

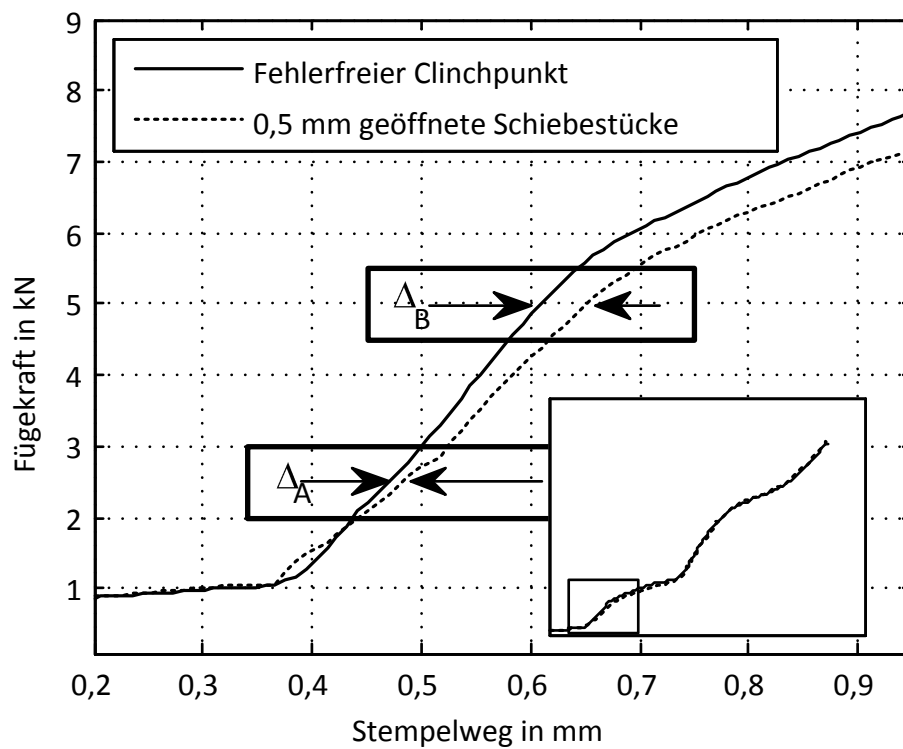


Bild 5.5. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve von der Referenzkurve beim Fehler "geöffnete Schiebestücke"

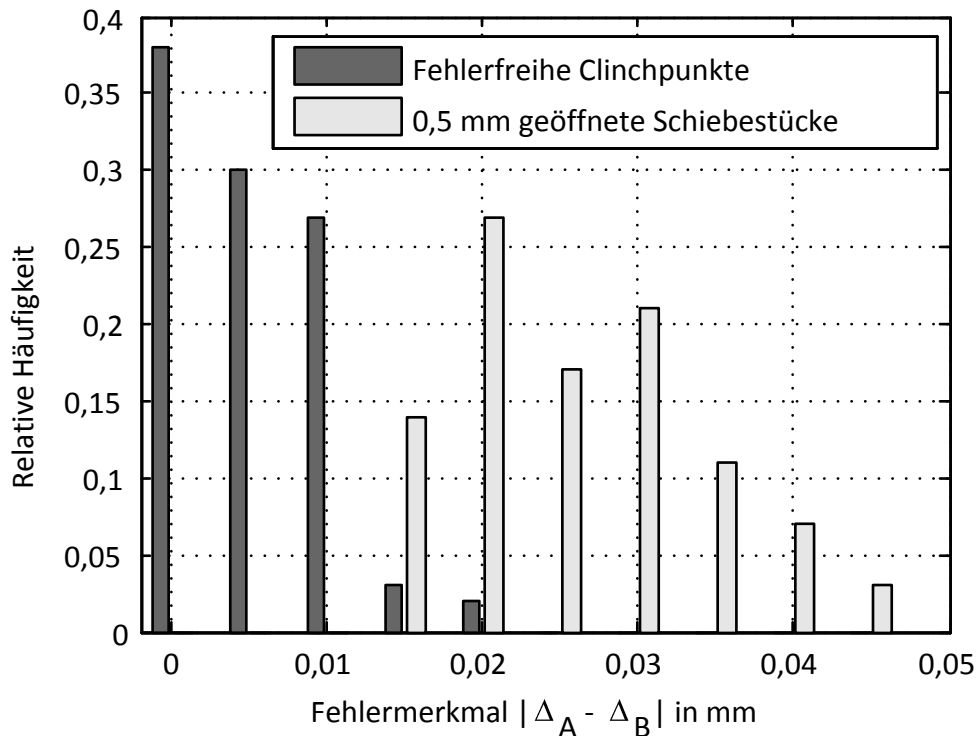


Bild 5.6. Verteilung der Merkmals-Funktion $|\Delta_A - \Delta_B|$ für fehlerfreie Clinchpunkte und Clinchpunkte mit einem Fehler "0,5 mm geöffnete Schiebbestücke" (aus Messungen ermittelt)

5.2 Verschlossener Stempel

Einer der am schwierigsten zu detektierenden Fehler, die im Betrieb auftreten können, ist der Abrasionsverschleiß des Übergangsradius von der Stempeldruck- zur Stempelmantelfläche. Die Form des Stempels kann als ein am Ende konisch zulaufender Zylinder beschrieben werden. Der Rand der Stirnseite des Stempels, nämlich der Stempeldruckfläche, bildet dabei keine scharfe Kante zur Stempelmantelfläche, sondern ist leicht abgerundet mit einem Krümmungsradius, der im Folgenden als Stempelrandradius R bezeichnet wird. Dieser Verschleiß rundet den Stempel ab und macht ihn schmaler und führt zu einer Verminderung der Belastungsfähigkeit des Clinchpunktes. Obwohl der Stempel selber aus einem gehärteten Metall gefertigt wird, vergrößert sich der Stempelrandradius nach häufigem Einsatz. Beträgt dieser für einen neuen Stempel noch $R = 0,2$ mm (hier auch als Stempel R02 bezeichnet), so weist er nach 100 000 – 200 000 Arbeitsgängen bereits einen Wert von bis zu $R = 0,4$ mm (analog als Stempel R04 bezeichnet) auf. Dieses wird durch die Änderung der Stempelgeometrie simuliert (Bild 5.7). In der Geometrie des Stempels wird der genaue Stempelradius angegeben. Bei der Vernetzung hingegen wird dieser Radius linear approximiert. Ein Verbesserungsvorschlag besteht in einer Erhöhung der Elementanzahl sowohl auf dieser Stelle am Stempel als auch auf dem jeweiligen Bereich des stempelseitigen Blechs.

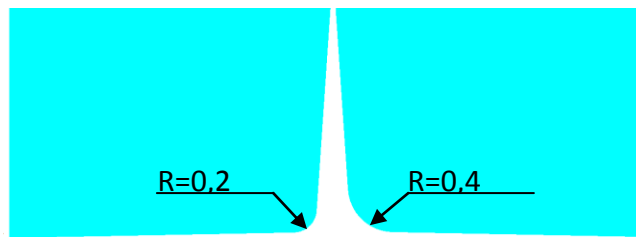


Bild 5.7. Seitlicher Modellvergleich eines normalen (links) und eines verschlissenen (rechts) Stempels

Im Bild 5.8 sind die Kraft-Weg-Kurven für Stempel mit drei Übergangsradien von 0,2-0,4-0,6 mm dargestellt. Obwohl die Haltekraft des Clinchpunktes schon bei $R = 0,4$ mm wesentlich geringer ist, lässt die Simulation eine Änderungstendenz im Verlauf abbilden. Der Verschleiß des Stempels lässt sich im Bereich 0,2 – 0,9 mm (Bild 5.8) untersuchen, in dem die Durchsetzphase (siehe Bild 2.20) stattfindet. Bild 5.9 zeigt den ausgewählten Bereich des Verlaufs. Die Änderungstendenz der Kraft-Weg-Kurve bei steigendem Übergangsradius wird durch zwei Pfeile gekennzeichnet. Die Fenster-Bereiche *C* und *D* (Bild 5.10) werden für die Berechnung von Abweichung ausgewählt.

In der Anfangsphase (unmittelbar vor dieser Durchsetzphase) muss die Kraft-Weg-Darstellung bei einem Stempel *R02* und einem Stempel *R04* annähernd gleich sein, da die Umformung im Anfangsbereich zwischen den Fenstern *A* und *B* nur geringfügig vom Stempelrandradius abhängt. Die Simulation sowie die Messergebnisse zeigen Abweichungen auch in der Stauchphase (Bild 5.8 ab Weg 1,2 mm) der Kraft-Weg-Kurve. Dieser Bereich wird zudem von weiteren Parametern, wie z.B. Materialeigenschaften und Abweichungen in der Matrize, stark beeinflusst und ist somit für die Erkennung eines Stempelverschleisses weniger geeignet.

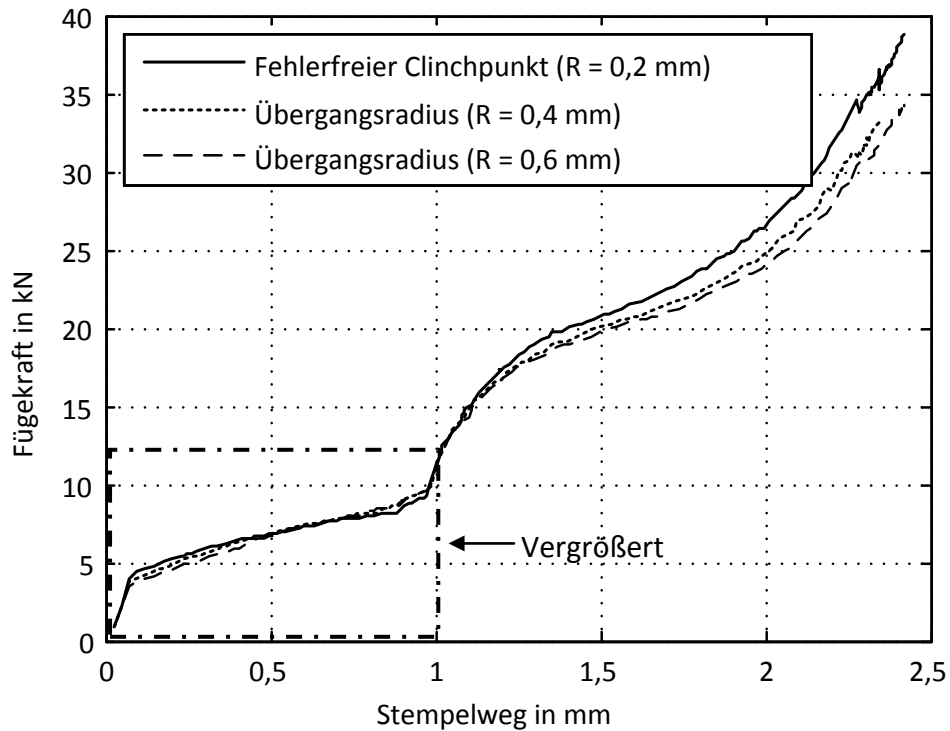


Bild 5.8. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „verschlossener Stempel“. Der i.O.-Clinchpunkt mit dem Übergangsradius $R = 0,2 \text{ mm}$ wird mit zwei Varianten des verschlossenen Stempels mit $R = 0,4 \text{ mm}$ und $R = 0,6 \text{ mm}$ verglichen

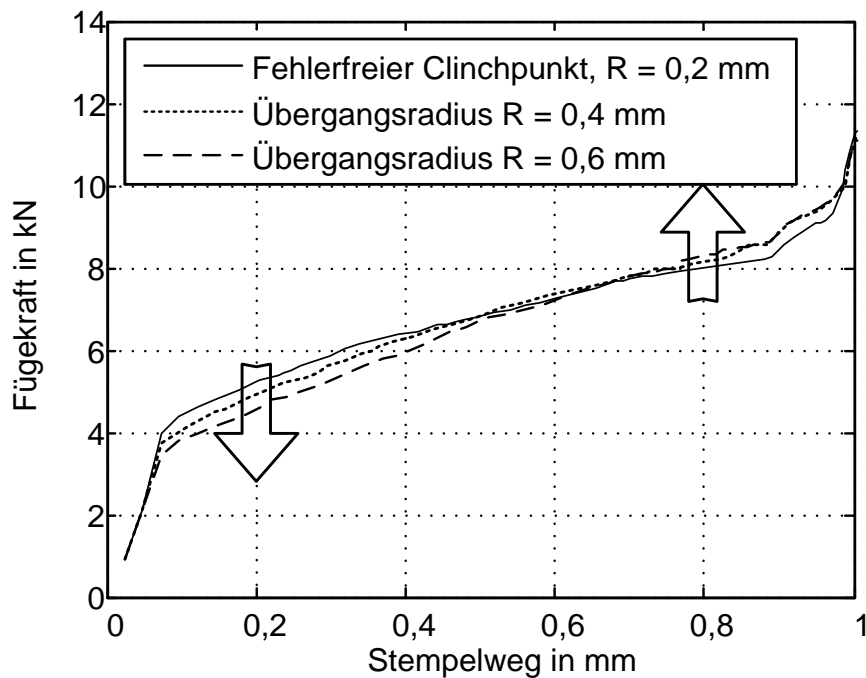


Bild 5.9. Vergrößerte Ansicht der Simulationsergebnisse für den Fehler „verschlossener Stempel.“ Die Pfeile zeigen die Tendenz beim Verschleiß des Stempels

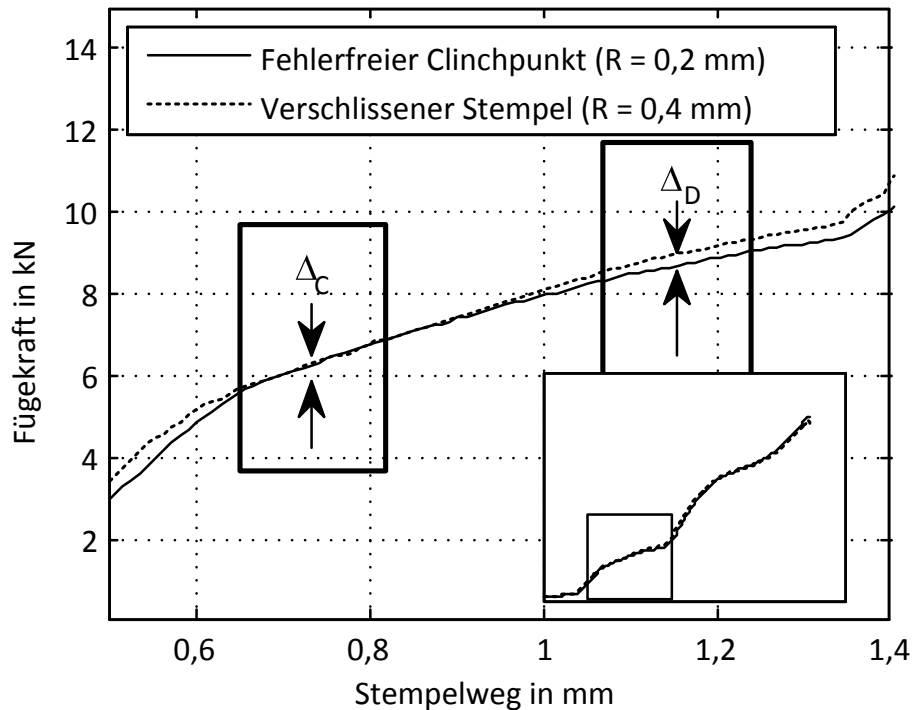


Bild 5.10. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve von der Referenzkurve beim Fehler "verschlossener Stempel" (Stempelradius 0,4 mm statt 0,2 mm)

Während der Durchsetzphase in den Bereichen C bis D verändert sich die Steigung der Kurve für den verschlossenen Stempel im Vergleich zu einem neuen Stempel. Diese Steigungsänderung ist ein Merkmal des Fehlers. Gibt es also einen deutlichen Unterschied zwischen den Verschiebungen des D- bzw. des C-Fensters, so lässt dies auf einen Fehler „verschlossener Stempel“ schließen. Dies kann wiederum mathematisch in Form eines Klassifikators ausgedrückt werden, indem eine Grenze S_{VS} für den Betrag der noch tolerierbaren Verschiebungsdifferenz eingeführt wird. Der Klassifikator lautet dann $|\Delta_C - \Delta_D| < S_{VS}$. Im Bild 5.11 ist das Histogramm der Merkmalsergebnisse für Clinchpunkte mit einem verschlossenen Stempel ($R = 0,4 \text{ mm}$) dargestellt.

Wiederum ist gleichzeitig das Histogramm mit den Ergebnissen für die fehlerfreien Clinchpunkte dargestellt. Hier lässt sich feststellen, dass die Streuung für die fehlerhaften Clinchpunkte etwa doppelt so groß ist wie bei den fehlerfreien Clinchpunkten. Es kommt zu einer deutlichen Überlappung, so dass ein nahezu vollständiges Ausschließen des Fehlers „verschlossener Stempel“ anhand dieses Merkmals eine sehr niedrige Grenze erfordern würde, was zu einem immensen Ausschussanteil führen würde. Wird hingegen die Grenze groß genug gewählt, so dass die allermeisten der fehlerfreien Clinchpunkte auch als solche erkannt werden, so kann immer noch ein Großteil der fehlerhaften Clinchpunkte detektiert werden. Diese Strategie empfiehlt sich bei diesem Merkmal auch deswegen, weil der Verschleiß des Stempels langsam und kontinuierlich vor sich geht und sich das Histogramm dementsprechend nur schrittweise von links nach rechts verschiebt. Prinzipiell bietet sich natürlich im-

mer auch die Möglichkeit, mehrere Clinchpunkte für die Fehlerdetektion heranzuziehen, um die Sicherheit der Entscheidung mittels einer Stichprobenanalyse zu erhöhen.

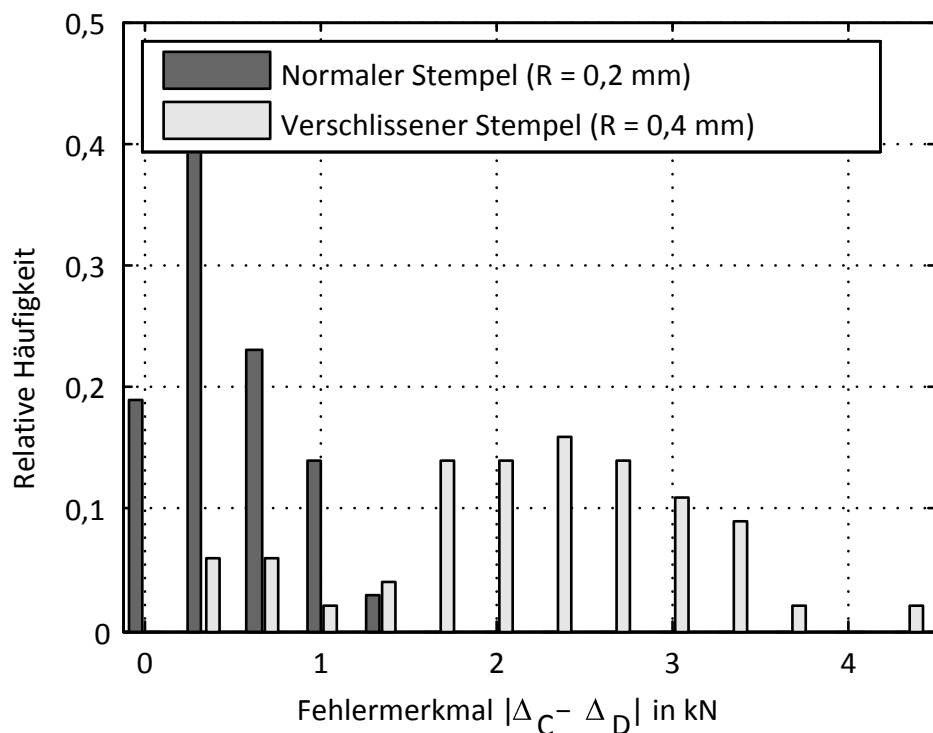


Bild 5.11. Verteilung der Merkmals-Funktion $|\Delta_C - \Delta_D|$ für fehlerfreie Clinchpunkte und Clinchpunkte mit dem Fehler "verschlossener Stempel" (Stempelradius 0,4 mm statt 0,2 mm) (aus Messungen ermittelt)

5.3 Falscher Stempel

Die Stempel für den untersuchenden Clinch-Typ werden in verschiedenen Varianten hergestellt. Als oft verwendbare und optisch leicht verwechselbare werden die folgenden drei Stempel ausgewählt:

- Artikel-Nr. 900.521, \varnothing 5,2 mm, Standard;
- Artikel-Nr. 900.501, \varnothing 5,0 mm, Fläche $1,61 \text{ mm}^2$ kleiner als Artikel-Nr. 900.521;
- Artikel-Nr. 900.541, \varnothing 5,4 mm, Fläche $1,66 \text{ mm}^2$ größer als Artikel-Nr. 900.521.

Beim zu untersuchenden „Rundpunkt“-Clinchen werden im wesentlichen Stempel mit einem Durchmesser von 5,2 bzw. 5,0 mm an der Stempelspitze verwendet (Bild 5.12). Im Modell wird der Durchmesser für jeden Stempeltyp angepasst.

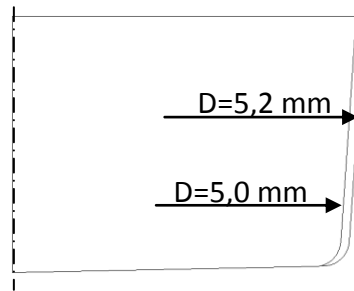


Bild 5.12. Seitenflächen von Stempeln mit einem Durchmesser von 5,2 und 5,0 mm

Die unterschiedlichen Durchmesser und damit die unterschiedlichen Stempel-Volumina, die ins Blech eingeführt werden, wirken mit unterschiedlichem Druck auf das den Stempel umgebende Metall. Dies macht sich an den Zonen E und F (siehe Bild 3.4) bemerkbar. Für einen kleineren Stempel steigt die Kraft-Weg-Kurve langsamer an, während für einen größeren Stempel eine höhere Kurvensteigung auftritt. Ein geeignetes Merkmal für den Fehlertyp „falscher Stempel“ ist daher der Betrag der Differenz der Verschiebungen von Fenster E und F, wie das Bild 5.14 verdeutlicht. Ein Fehler vom Typ „falscher Stempel“ liegt dann vor, wenn die Ungleichung $|\Delta_F - \Delta_E| < S_{FS}$ verletzt ist. Wie gut das gewählte Merkmal zur Detektion des Fehlers geeignet ist, verdeutlicht Bild 5.15. Hier sind die Merkmalswerte in Form eines Histogramms aufgetragen, die sich für Clinchpunkte mit einem falschen Stempel sowie für fehlerfreie Clinchpunkte mit einem korrekten Stempel ergeben. Es ist erkennbar, dass sich die Histogramme für die untersuchten Clinchpunkte nicht überlappen, sondern sich lediglich berühren.

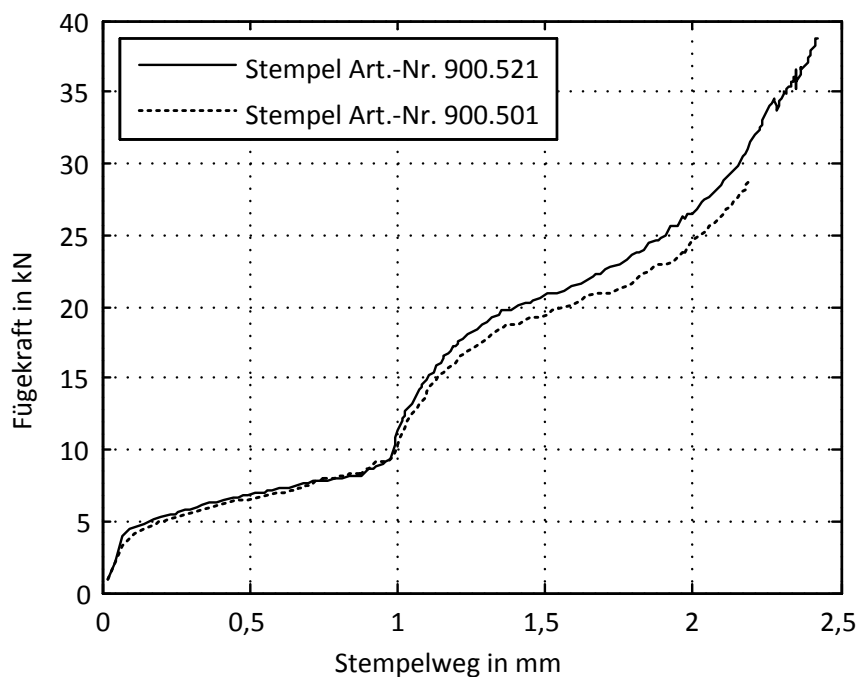


Bild 5.13. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „falscher Stempel“

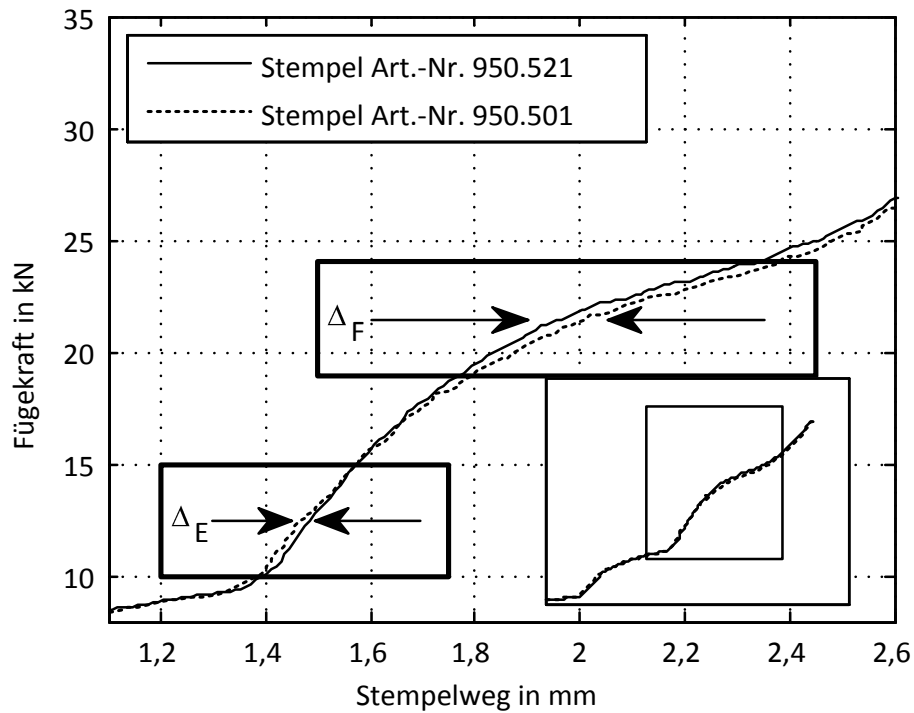


Bild 5.14. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve vom Referenzverlauf bei dem Fehler "falscher Stempel" (Stempel Art.-Nr. 900.501 statt Art.-Nr. 900.520, d.h. Durchmesser 5,0 mm statt 5,2 mm)

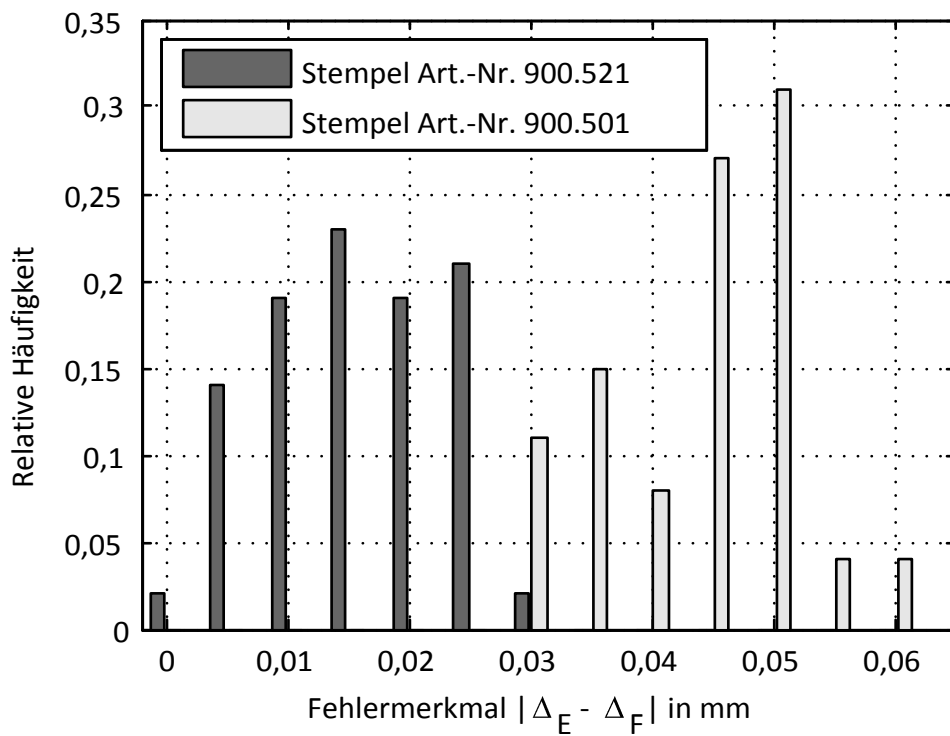


Bild 5.15. Verteilung der Merkmals-Funktion $|\Delta_F - \Delta_E|$ für fehlerfreie Clinchpunkte und Clinchpunkte mit dem Fehler "falscher Stempel" (Stempel Art.-Nr. 900.501 statt Art.-Nr. 900.520, d.h. Durchmesser 5,0 mm statt 5,2 mm) (aus Messungen ermittelt)

5.4 Falsche Matrize

Analog zu einem falschen Stempel kann es ebenfalls vorkommen, dass aus Versehen eine falsche Matrize verwendet wird. Die Matrizen unterscheiden sich in der Senkung der Bodenfläche, bzw. dem Abstand zwischen Amboss- und Schiebestück-Flächen (Bild 5.16). Eine Installation einer falschen Matrize führt zu einer Veränderung der Bodendicke und löst damit eine Verzögerung des Kraftanwachsens aus. Im Modell wird die Matrizentiefe bei der konstanten Lage des Schiebestücks angepasst. Die Matrizen werden in zwei Varianten hergestellt:

- Artikel-Nr. 950.09, Standard;
- Artikel-Nr. 950.10, Matrizen-Bodenfläche um 0,1 mm abgesenkt.

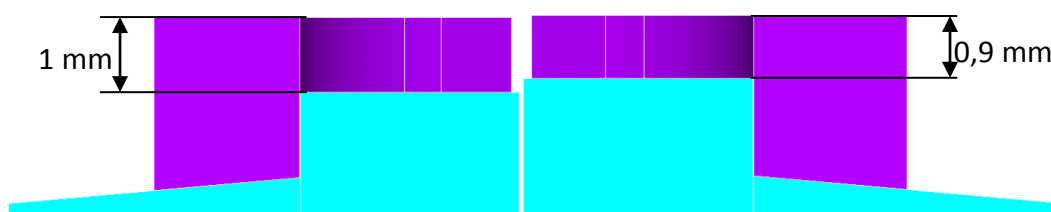


Bild 5.16. Modell von zwei Matrizen mit der Matrizentiefe 1,0 mm (links) und 0,9 mm (rechts)

Dieser Fehler lässt sich durch Betrachtung des Endbereiches der Kraft-Weg-Kurve (Bild 5.17), bzw. der Bereiche *G* und *H* der Stauchphase, beschreiben (Bild 5.18). Analog zum Fehler eines falschen Stempels wird der Betrag der Differenz der vertikalen Verschiebungen Δ_H und Δ_G zur Fehlererkennung herangezogen. Mit Hilfe eines empirisch ermittelten Grenzwerts S_{FM} für einen Fehler „falsche Matrize“ ergibt sich damit die Ungleichung $|\Delta_H - \Delta_G| > S_{FM}$ als Klassifikator.

Das entsprechende Histogramm für den Fehler „falsche Matrize“ zeigt Bild 5.19. Es ist erkennbar, dass sowohl die Merkmalswerte für fehlerfreie Clinchpunkte als auch die Werte für fehlerhafte Clinchpunkte relativ weit gestreut sind, wobei es dennoch zu nur vergleichsweise geringen Überlappungen kommt, so dass eine gute Fehlerdetektion möglich ist.

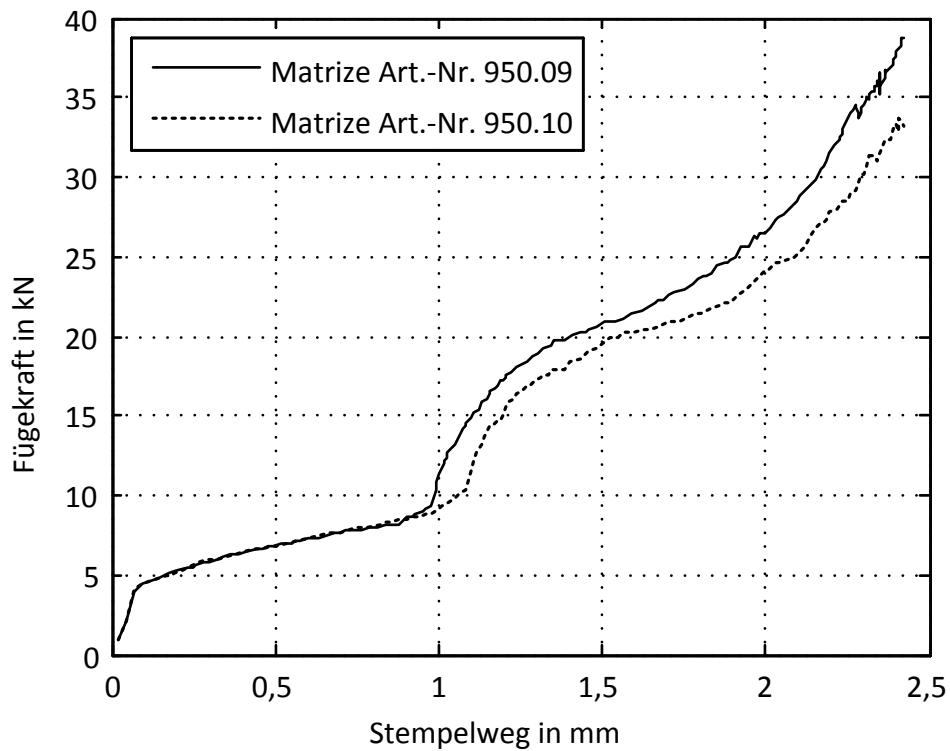


Bild 5.17. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „falsche Matrize“

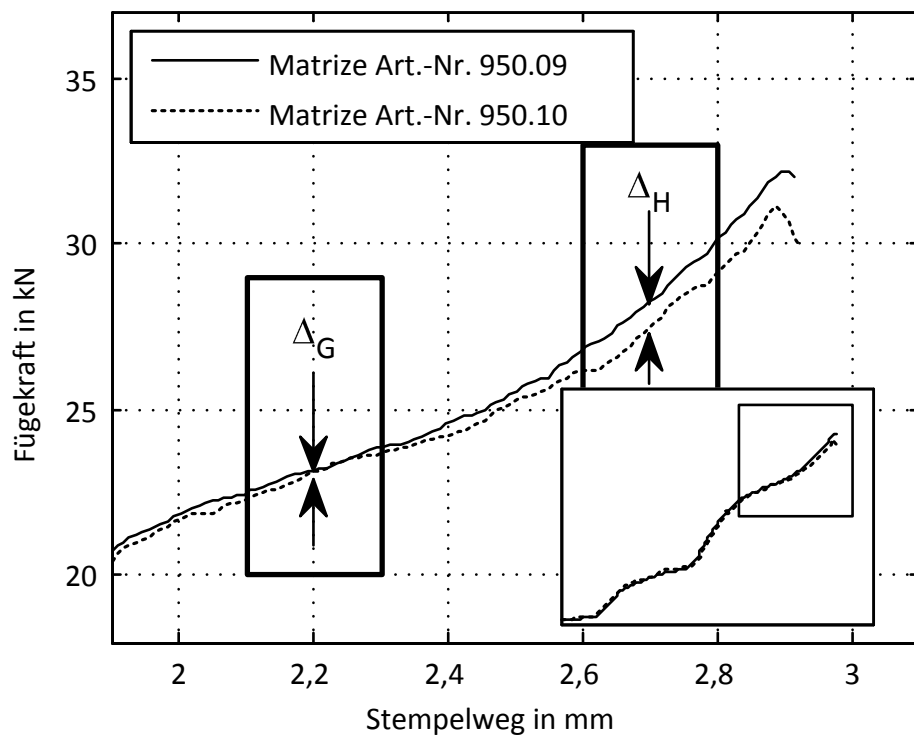


Bild 5.18. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve vom Referenzverlauf bei dem Fehler „falsche Matrize“ (Matrize Art.-Nr. 950.10 statt Art.-Nr. 950.09, d.h. Matrizen-Bodenfläche 1,0 mm statt 0,9 mm abgesenkt)

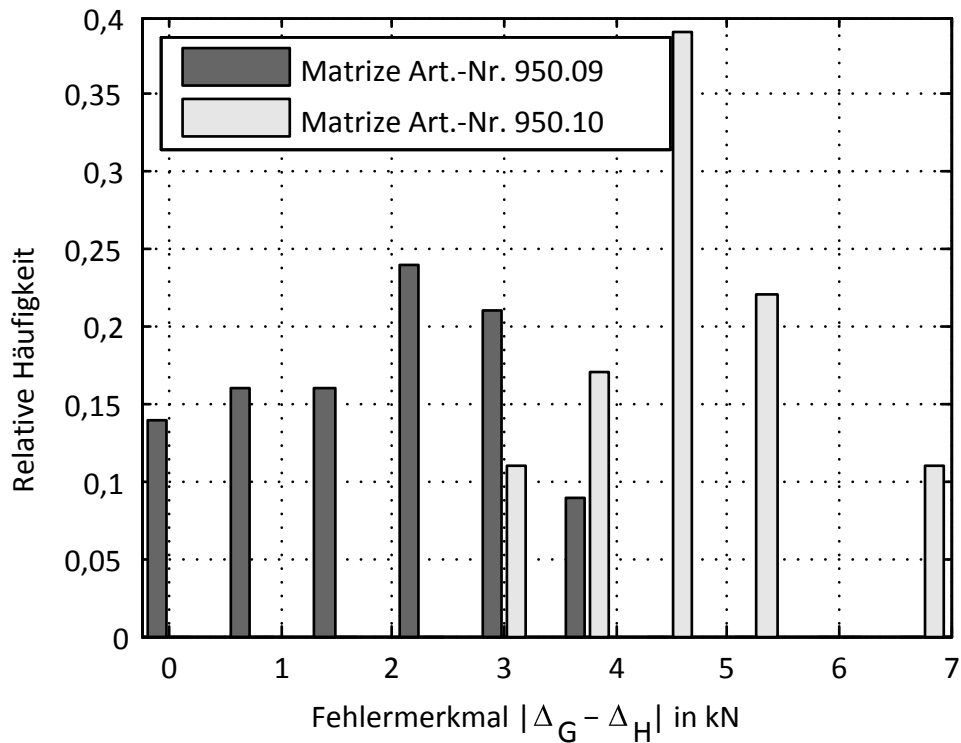


Bild 5.19. Verteilung der Merkmals-Funktion $|\Delta_H - \Delta_G|$ für fehlerfreie Clinchpunkte und Clinchpunkte mit dem Fehler "falsche Matrize" (Matrize Art.-Nr. 950.10 statt Art.-Nr. 950.09, d.h. Matrizen-Bodenfläche 1,0 mm statt 0,9 mm abgesenkt) (aus Messungen ermittelt)

5.5 Partiiell ausgebrochener Stempel

Bei der Simulation eines partiellen Ausbruchs der Druckflächen des Stempels wird die starre Druckfläche des Teils modifiziert (Bild 5.20).

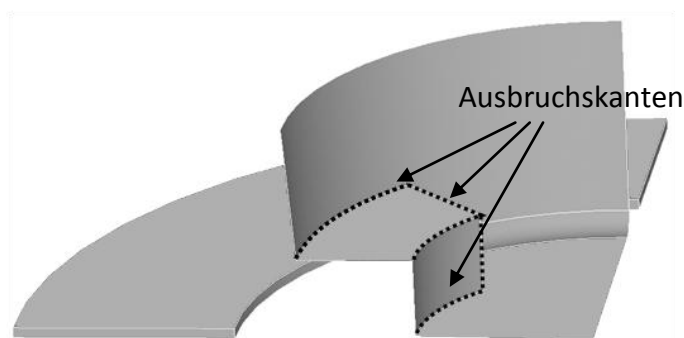


Bild 5.20. Modell des ausgebrochenen Stempels mit dem Niederhalter

Es ist zu beachten, dass die Spannungen, die auf den scharfen Ausbruchskanten auftreten, hoch sind und zu einer schlechten Konvergenz des Berechnungsprozesses führen. Die Konvergenz ist durch eine zusätzliche Vernetzung des Werkstücks im Ausbruchs-Bereich zu verbessern. Die Unstetigkeiten auf der simulierten Kraft-Weg-Kurve (Bild 5.21) werden durch die Umformung der relativ großen diskreten Elemente an den Ausbruchskanten verursacht.

Wie im Bild 5.22 ersichtlich, findet die erste Abweichung im Bereich 0,7 – 1,3 mm statt. Hier wird das Werkstück nur durch den Stempel plastisch verformt. Die verringerte Stempelfläche lässt den bestimmten Positionswert mit einer geringen Kraft erreichen. Nach dem Kontakt mit dem Amboss (auf Stempelweg 1,3 mm) wird das Metall gestaucht und zur Seite hin verdrängt. Das Stempelvolumen wird beim Ausbruch verringert und die Fügekraft entsprechend reduziert. Dieses findet im Bereich von 1,3 mm des Stempelwegs statt. Zur Fehlererkennung kann der Betrag der Differenz der vertikalen Verschiebungen Δ_D herangezogen werden. Als Klassifikator ergibt sich damit die Ungleichung $\Delta_D < S_{AS}$ (Bild 5.23).

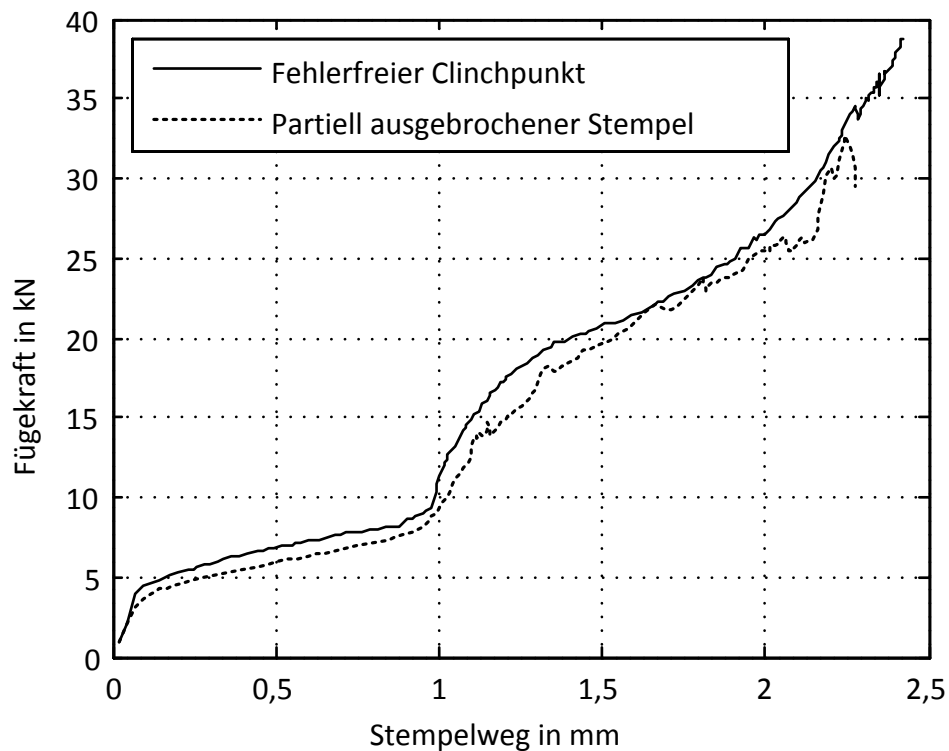


Bild 5.21. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „ausgebrochener Stempel“

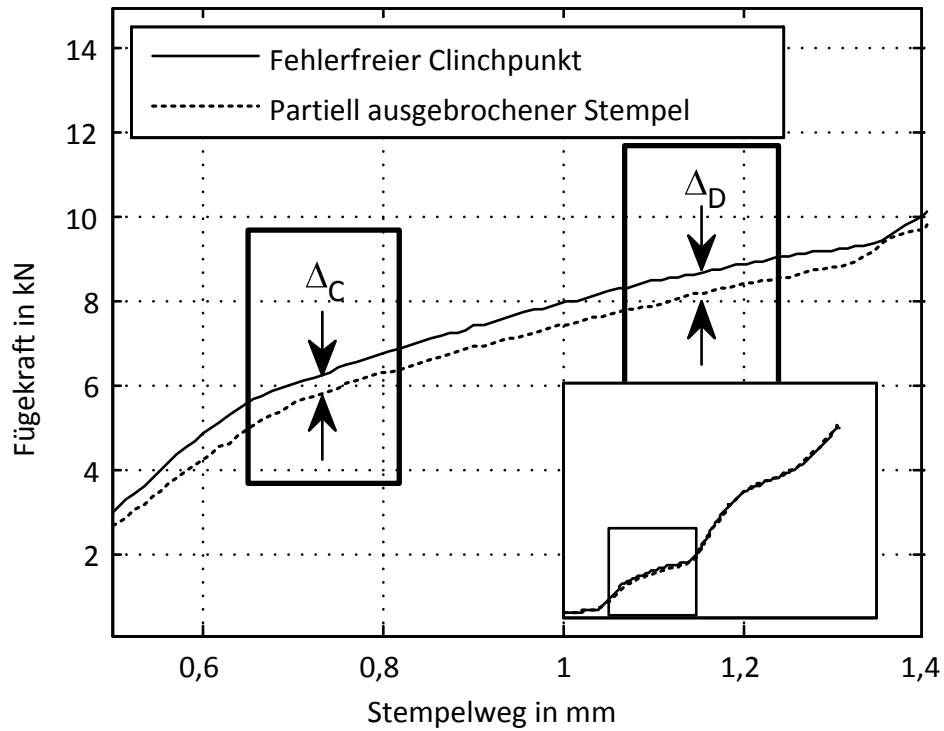


Bild 5.22. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve vom Referenzverlauf bei dem Fehler "ausgebrochener Stempel" (Stempel Art.-Nr. 900.521 mit um $2,8 \text{ mm}^2$ von $21,2 \text{ mm}^2$ auf $18,4 \text{ mm}^2$ verringerten Druckfläche)

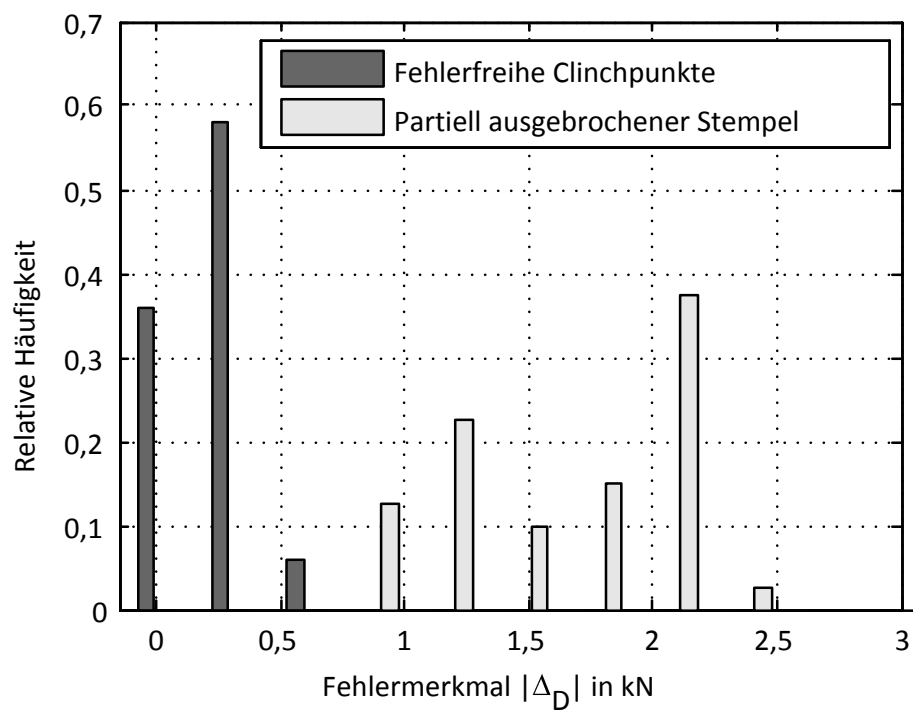


Bild 5.23. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve vom Referenzverlauf bei dem Fehler "ausgebrochener Stempel" (Stempel Art.-Nr. 900.521 mit um $2,8 \text{ mm}^2$ von $21,2 \text{ mm}^2$ auf $18,4 \text{ mm}^2$ verringerten Druckfläche)

5.6 Ausgebrochene Matrize

Unter dem Oberbegriff „grobe Fehler“ werden hier diejenigen Fehler bezeichnet, die zu großen Veränderungen des Kraft-Weg-Verlaufs führen. Dies ist sehr häufig bei einem komplett ausgebrochenen Stempel oder bei einer abgebrochenen Matrize der Fall. Als Folge kann die Messkurve überhaupt nicht mehr durch ein Fenster verlaufen oder eine horizontale sowie vertikale Fensterberandung schneiden, was sehr leicht mit vorhandenen Methoden (siehe Abschnitt 2.5) detektiert werden kann. Somit wird die Fensterberandung, d.h. die Breite eines Fensters für eine horizontale Verschiebung bzw. die Höhe eines Fensters für eine vertikale Verschiebung, zur Vorselektion grober Fehler genutzt und muss entsprechend gewählt werden. Allerdings können auch grobe Fehler auftreten, bei denen dennoch die Messkurve innerhalb des Fensters verläuft. Diese können durch einen nächsten Schritt erfasst werden, indem für jedes Fenster eine maximal erlaubte Verschiebung $\Delta_{x_{\max}}$ definiert wird, z.B. als Vielfaches der Standardabweichung der für die Referenzkurve verwendeten Kraft-Weg-Kurven für das jeweilige Fenster. Es wird $\Delta_{x_{\max}} = 2\sigma$ vorgeschlagen. Als Klassifikator für grobe Fehler ergibt sich demnach die Ungleichung $\Delta_X < \Delta_{x_{\max}}, X \in \{A, B, \dots, G, H\}$.

Die Simulation eines partiellen Matrizenausbruchs ähnelt der eines partiellen Stempelausbruchs. Das Modell des Ambosses ist im Bild 5.24 dargestellt. Die Simulations- und Messergebnisse sind in Bild 5.25 und Bild 5.26 zu sehen. Die wesentlichen Abweichungen der Kraft-Weg-Kurve eines fehlerhaften Clinchpunktes sind in der Stauchen- und Verdrängungsphase auffallend. Hier fließt das Blechmaterial im Bruch, was deutlich weniger Kraft verbraucht. Als Beispiel ist der Klassifikator $\Delta_H < S_{AM}$ auf dem Bild 5.27 zu sehen.

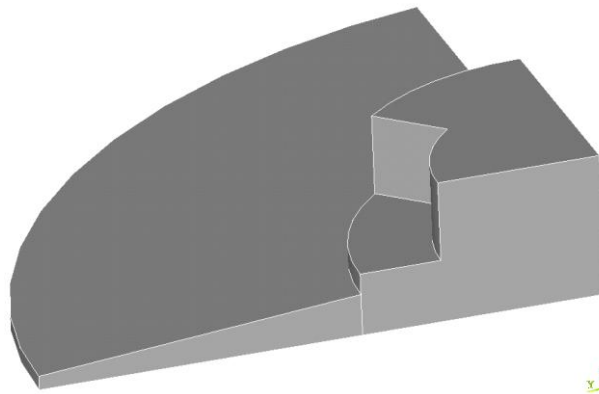


Bild 5.24. Modell des ausgebrochenen Ambosses (Matrize)

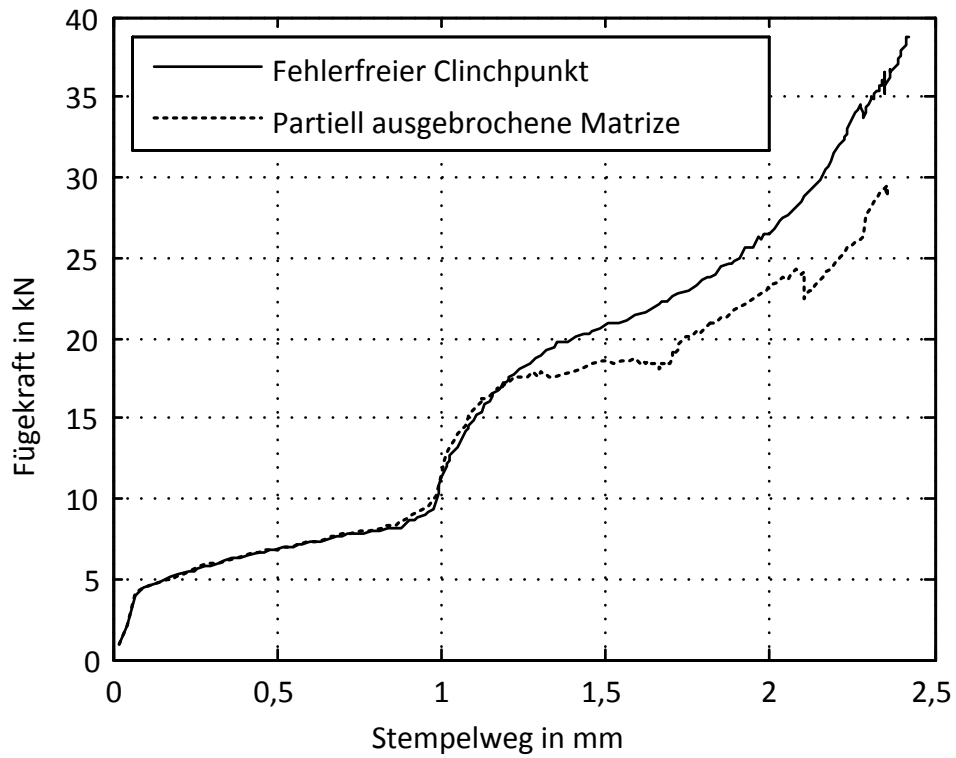


Bild 5.25. Kraft-Weg-Kurve aus den Simulationsergebnissen für den Fehler „ausgebrochene Matrize“

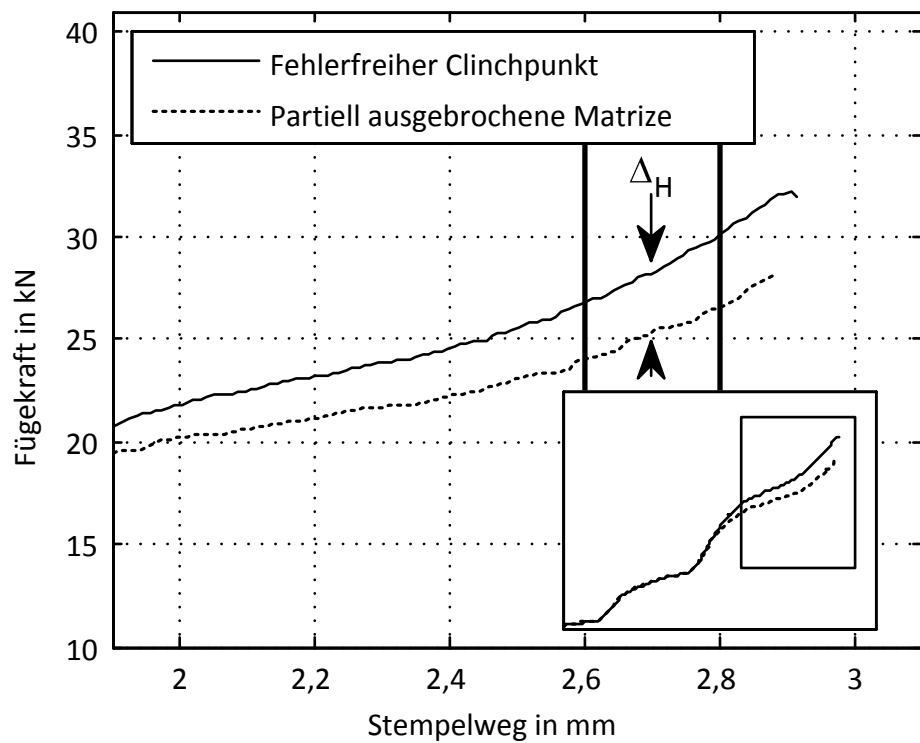


Bild 5.26. Abweichung der gemessenen Kraft-Weg-Kurve vom Referenzverlauf bei dem Fehler „ausgebrochene Matrize“ (Matrize Art.-Nr. 950.09 mit um $2,9 \text{ mm}^2$ von $28,3 \text{ mm}^2$ auf $25,4 \text{ mm}^2$ verringerter Ambossdruckfläche)

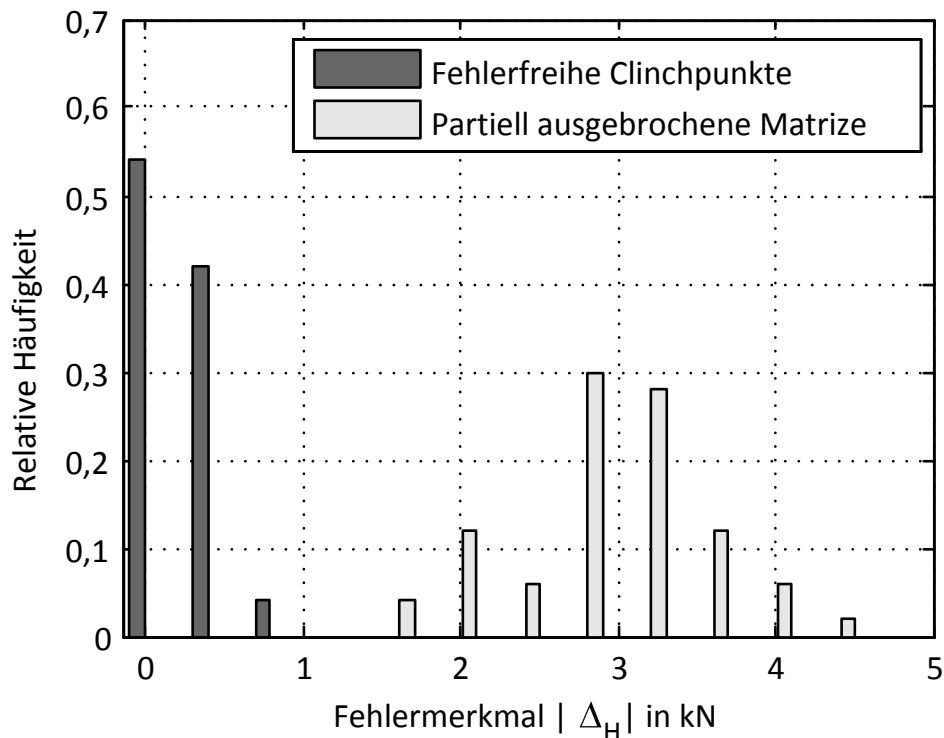


Bild 5.27. Verteilung der Merkmals-Funktion Δ_H für fehlerfreie Clinchpunkte und Clinchpunkte mit dem Fehler „ausgebrochene Matrize“ (Matrize Art.-Nr. 950.09 mit um $2,9 \text{ mm}^2$ verringerten Ambosdruckfläche (von $28,3 \text{ mm}^2$ auf $25,4 \text{ mm}^2$) (aus Messungen ermittelt)

5.7 Falsche Blechpaarung

In automatisierten Fertigungslinien kann eine Clinchanlage zum Fügen von mehreren Blechkombinationen eingerichtet werden. In solchen Fällen wird das Prozessüberwachungssystem zwischen mehreren Programmen (Referenzkurven) umgeschaltet. Dabei unterscheiden sich insbesondere die Blechkombinationen wesentlich (siehe z.B. die Referenzkurven für Stahl-Stahl, Aluminium-Stahl und Stahl-Aluminium auf dem Bild 3.2). Falls beim Umprogrammieren ein falsches Messprogramm ausgewählt wird, wird dieses beim nächsten Clinchvorgang als „grober Fehler“ dargestellt.

5.8 Bestimmung der Klassifizierungsgrenze

Für die Bestimmung der Schwellenwerte der Klassifikatoren wird standardmäßig ein Test mit dem Stempel Art.-Nr. 900.521 und der Matrize Art.-Nr. 950.09 durchgeführt. Das entwickelte Überwachungssystem wurde dabei auf weichem Stahl zum Kaltumformen DC04 (Werkstoffnummer nach DIN EN 10027-2 [82] – 1.0338, Gütenorm EN 10130 [83]) getestet, wobei die nominale Blechdicke 1 mm betrug. Aus einem großen Stahl-Blech (1 m x 2 m) wurden zunächst Test-Bleche der Abmessungen 30 mm x 200 mm ausgeschnitten. Auf solch ein Blech mit einer Breite von 30 mm kann ein Clinchpunkt mit einem Abstand zum Blechrand von ca. 10 mm gefügt werden. Die Länge des Blechs wurde aus Gründen der Bedienungsfreund-

lichkeit gewählt. Jedes Test-Blech bietet Platz für neun Clinchpunkte. Daher wurde jedes Test-Blech in neun Punkte unterteilt, welche mit den Buchstaben A bis I gekennzeichnet wurden. Zusätzlich wurden die einzelnen Bleche durchnummeriert und schließlich paarweise zusammen geclincht (Bild 5.28).

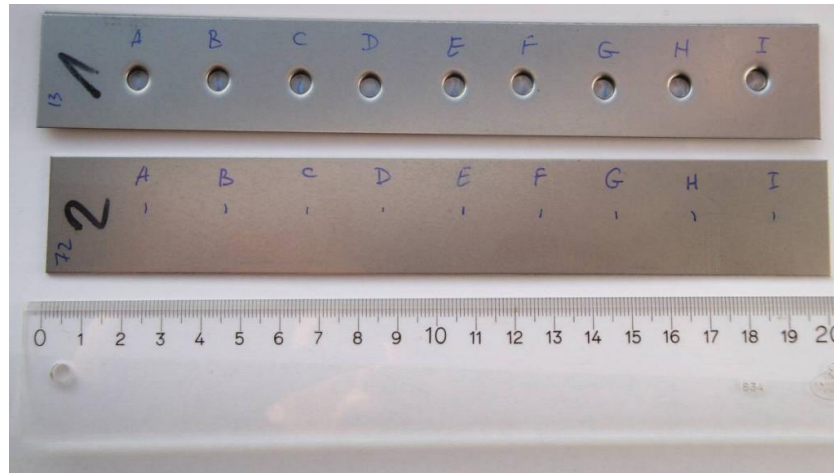


Bild 5.28. Darstellung eines zum Einsatz vorbereiteten Blechs und ein bereits geclinchtes Test-Blech (Stahl DC04 mit der Blechdicke 1 mm)

Zur Überprüfung der Validierung der Überwachungsfunktionalität wurden insgesamt 190 Clinchpunkte und ihre entsprechenden Kraft-Weg-Kurven herangezogen, wovon ca. 30 % fehlerfrei und 70 % fehlerbehaftet waren. Bei der Wahl der Schwellenwerte für die einzelnen Entscheidungsregeln wurde folgendermaßen vorgegangen. Für jeden Fehlertyp wurde aus den im Rahmen der Merkmalsextraktion ermittelten Histogrammen eine obere bzw. untere Grenze ermittelt. Diese repräsentieren die beiden Extreme, d.h. Fehlertyp α möglichst klein bzw. minimaler Ausschuss und Fehlertyp β möglichst klein, d.h. maximale Fehlerdetektion. Dieser durch diese Grenzen markierte Bereich wurde weiterhin äquidistant unterteilt, so dass insgesamt für jeden Fehlertyp sieben Einstellungen für den zu wählenden Schwellenwert untersucht wurden. Auch der Anwender erhält später die Möglichkeit, für jeden Fehlertyp zwischen solchen vorgegebenen sieben Einstellmöglichkeiten für die Wahl der Schwelle zu wählen. Damit kann er durch eine geeignete Auswahl der jeweiligen Grenze gewisse Fehlertypen stärker oder schwächer gewichten und so die Überwachungsfunktion an die jeweilige Aufgabenstellung und Zielsetzung anpassen. Bei der hier durchgeführten Untersuchung wurden jedoch als Standardfall alle Fehlertypen gleich gewichtet, d.h. für alle Fehlertypen wurde jeweils die gleiche Einstellmöglichkeit bzw. Schwellenwert-Nr. gewählt. Tabelle 5.1 zeigt eine Auflistung der für jeden Fehlertyp bestimmten sieben Schwellenwertmöglichkeiten sowie das daraus resultierende Ergebnis für die 190 betrachteten Clinchpunkte für jede gewählte Schwellenwert-Nr. Zur Verdeutlichung ist im Bild 5.29 der Verlauf der Fehlertypen und ihre Abhängigkeit von der gewählten Schwellenwert-Nr. dargestellt.

Tabelle 5.1. Mögliche Schwellenwerteinstellungen für alle Fehlertypen und resultierendes Ergebnis der Überwachungsfunktion

Fehlertyp	Schwellenwert	Schwellenwert-Nr.						
		1	2	3	4	5	6	7
Ausgebrochener Stempel	ΔC_{\max}	$1,4\sigma$	$1,6\sigma$	$1,8\sigma$	2σ	$2,3\sigma$	$2,5\sigma$	$2,8\sigma$
Geöffnete Schiebestücke	$ \Delta A - \Delta B $, mm	0,01	0,012	0,013	0,015	0,017	0,018	0,02
Verschlossener Stempel	$ \Delta C - \Delta D $, kN	168	192	216	240	264	300	324
Falscher Stempel	$ \Delta E - \Delta F $, mm	0,02	0,024	0,027	0,03	0,033	0,036	0,04
Falsche Matrize	$ \Delta H - \Delta G $, kN	480	528	564	600	636	672	720
Ergebnisse		Schwellenwert-Nr.						
		1	2	3	4	5	6	7
Fehlerfrei als „n.i.O.“ (Fehler α)		48%	20%	4,5%	0%	0%	0%	0%
Fehlerhaft als „i.O.“ (Fehler β)		0%	0,7%	1,4%	4%	9%	14%	20%

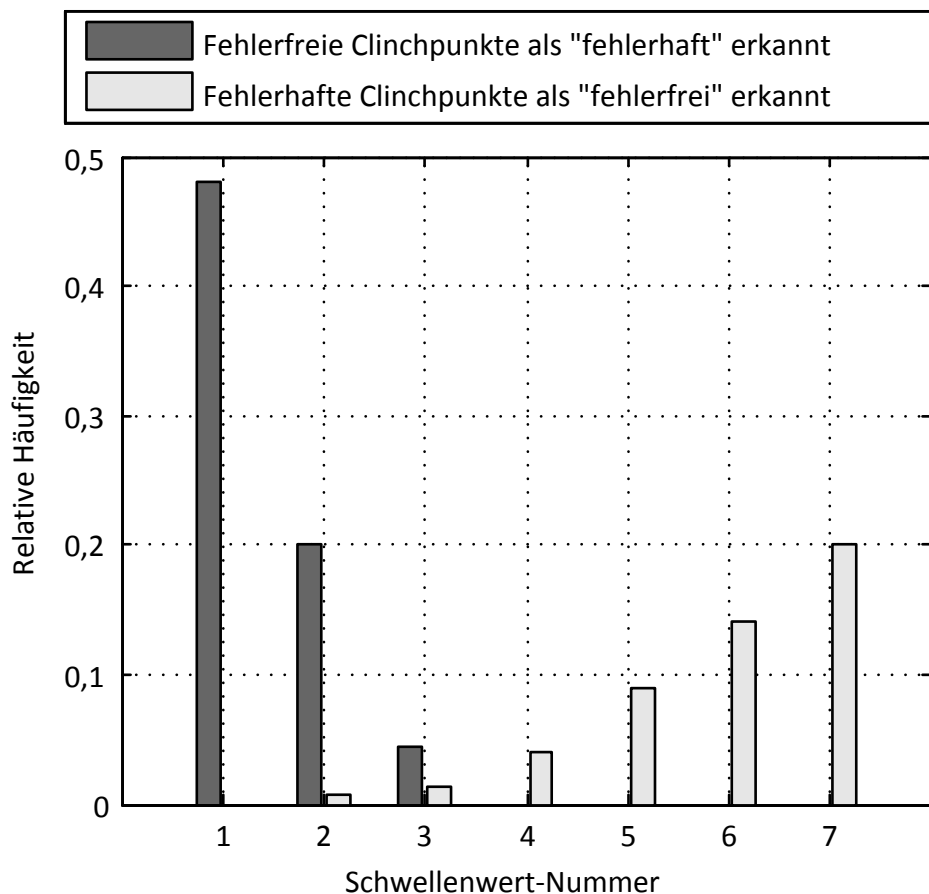


Bild 5.29. Relative Häufigkeit der Fehlertypen α (fehlerfreie Clinchpunkte als "fehlerhaft" erkannt) und β (fehlerhafte Clinchpunkte als "fehlerfrei" erkannt) in Abhängigkeit von der gewählten Schwellenwert-Nummer

Es ergibt sich für den Schwellenwert-Nr. 1 ein minimaler Fehler vom Typ β , d.h. es werden alle fehlerhaften Clinchpunkte als solche erkannt. Allerdings ergibt sich bei dieser Einstellung ein Fehler vom Typ α von fast 50 %, d.h. die Hälfte aller fehlerfreien Clinchpunkte wird fälschlicherweise als Ausschuss bewertet. Dieser Wert sinkt allerdings sehr schnell mit zunehmender Verschiebung der Schwellenwerte zu höheren Werten, so dass bereits bei einer eingestellten Schwellenwert-Nr. 4 der Fehlertyp α auf praktisch null abgefallen ist. Wird die Schwellenwert-Nr. weiterhin erhöht, so steigt der Fehler vom Typ β erwartungsgemäß an, beträgt allerdings bei Schwellenwert-Nr. 7 lediglich 20 %. Der Anstieg erfolgt auch deutlich flacher als dies beim Fehlertyp α der Fall ist. Ursache dafür ist, wie bereits erwähnt, dass ein auftretender Fehler nicht nur Auswirkungen auf sein zugeordnetes Merkmal hat, sondern die gesamte Kurve betrifft und somit ein fehlerhafter Clinchpunkt mit einer höheren Wahrscheinlichkeit detektiert wird als durch sein Merkmal alleine. Bei genauer Betrachtung des Bild 5.29 wird erkannt, dass sich beide Kurven relativ nahe der Schwellenwerteinstellung Nr. 4 schneiden, welche auch das arithmetische Mittel der sieben Einstellmöglichkeiten darstellt. Für viele Anwendungsfälle dürfte daher die Einstellung eines mittleren Schwellenwerts eine gute (optimale) Wahl darstellen. In Tabelle 5.2 sind die Testergebnisse nach unterschiedlichen Fehler-Typen bei der Schwellenwert-Nr. 4 zusammengefasst. Hier zeigt sich, dass für diese Stichprobe nahezu alle Fehler zu beinahe 100 % erkannt werden und selbst der schwierig zu detektierende Fehler „verschlissener Stempel“ mit immerhin 70 % noch einen sehr hohen Wert aufweist. Dies zeigt, dass mit dem neu entwickelten Überwachungsverfahren eine deutliche Leistungssteigerung im Vergleich zu den konventionellen Verfahren erzielt werden kann. Grundlage dafür ist die neuartige detaillierte Messkurvenanalyse und Merkmalsextraktion.

Es sei noch erwähnt, dass die hier für jeden Fehlertyp zur Auswahl gestellten sieben Schwellenwertmöglichkeiten auch als ein Vielfaches der Standardabweichung dargestellt werden können, welche sich für das jeweilige Merkmal für fehlerfreie Clinchpunkte ergibt. Diese Standardabweichungen können dabei im Zuge der Ermittlung der Referenzkurve berechnet werden. Damit können die hier ermittelten Schwellenwerteinstellungen automatisch an andere Prozesse angepasst werden.

Tabelle 5.2. Erkennungswahrscheinlichkeit der einzelnen Fehler für Schwellenwert-Nr. 4

Werkzeug, Material	Fehler	Fehlererkennungs- wahrscheinlichkeit
Stempel Art.-Nr. 900.521 mit um 2,8 mm ² verringerter Druckfläche (von 21,2 mm ² auf 18,4 mm ²)	Ausgebrochener Stempel	100%
Matrize Art.-Nr. 950.09 mit um 2,9 mm ² verringerter Ambossdruckfläche (von 28,3 mm ² auf 25,4 mm ²)	Ausgebrochene Matrize	100%
Stahl-Halbring, Stärke 0,5 mm, Ø 6 mm	0,5 mm einseitig geöffnetes Schiebestück	98%
Stahl-Ring, Stärke 0,5 mm, Ø 6 mm	1,0 mm geöffnete Schiebestücke	100%
Stempel Art.-Nr. 900.521 mit dem Stempelrandradius R04 statt R02	Verschlissener Stempel	70%
Stempel Art.-Nr. 900.501	Falscher Stempeltyp	100%
Matrize Art.-Nr. 950.10	Durchsetztiefe 1,0 statt 0,9 mm	100%
Aluminiumblech	Anderes Material	100%
Fehlerfreier Clinchpunkt	– keine –	<1%

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der Maschinenbau- und Fahrzeugbauindustrie ist eine Blechverbindung durch Clinchen in großem Umfang verbreitet. Die Qualität des verarbeitenden Bauteils muss dabei ebenfalls den höheren Anforderungen entsprechen. In bisherigen Verfahren zur Online-Prozessüberwachung kamen primär diejenigen Methoden zum Einsatz, die sich auf der Analyse von maximalen Werten, Abweichungen der Kraft-Weg-Kurven mittels Toleranzband oder Fenster-Technik basieren. Ziel dieser Arbeit war es, die Überwachungstechnik für die Clinchwerkzeuge und damit einhergehend den gesamten Clinchprozess nachhaltig zu verbessern, indem die Werkzeugtechnik enger und besser mit der Überwachungstechnik verzahnt wird. Hierzu wurde die Entwicklung von neuartigen Methoden zur Signalverarbeitung und Signalklassifizierung angestoßen, die aus einer verbesserten Messkurvenanalyse resultieren. In der vorliegenden Arbeit wurden im Bereich der Kraft-Weg-Sensorik erhebliche Fortschritte gegenüber dem Stand der Technik erarbeitet. Durch den Einsatz von modernen mathematischen Methoden zur Merkmalsextraktion, Signifikanzanalyse und statistischen Klassifizierung wurde die Empfindlichkeit und Robustheit der Auswertung verbessert. Neben einer deutlich verbesserten Fehlererkennung – es werden etliche Fehler erkannt, die früher nicht oder nur sehr unsicher detektierbar waren – wurde in der Arbeit erstmals eine dedizierte Fehleranalyse und Ursachenzuweisung realisiert. Es ist daher mit dem entwickelten System nicht nur möglich, eine sehr sensitive “in Ordnung”-/“nicht in Ordnung”-Klassifizierung durchzuführen, sondern es können zusätzlich Hinweise darauf gegeben werden, welche Ursachen wahrscheinlich zu dem jeweiligen Fehlklassifizierungsergebnis geführt haben.

Die im Rahmen der Arbeit eingesetzte Simulation mit der Finite-Elemente-Methode hat den Kenntnisstand der Prozesse, die beim Durchsetzfügen stattfinden, darüber hinaus zusätzlich erweitert. Heuristische Faktoren und Schwellenwerte, die intransparent und daher nur sehr aufwendig einzustellen und kaum quantitativ dokumentier- und kommunizierbar sind, wurden weitgehend durch wenige physikalisch interpretierbare und quantifizierbare Einstellparameter ersetzt. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den direkt gemessenen Abläufen.

Ferner wurden deutliche Fortschritte in Hinblick auf die Bedienbarkeit erreicht. Der Benutzer stellt nur noch die Sensitivität (die Schärfe des Urteils) des Systems bzgl. bestimmter für den Benutzer leicht nachvollziehbarer Fehlerarten ein und sämtliche weiteren dahinterliegenden Schwellenwerte werden nach einer kurzen einfachen Trainingsphase automatisch basierend auf statistischen Methoden berechnet. Das entwickelte Verfahren ermöglicht die Reduzierung von Fehlbedienungen und eine Reduzierung von unnötigen Aufwendungen und Abhängigkeiten bei der Produktion.

Das in der vorliegenden Arbeit entwickelte Verfahren zur Online-Prozessüberwachung und Fehlererkennung stellt auch eine Basis für die weiteren Untersuchungen dar. Der offensicht-

tlische Schritt zur Weiterentwicklung besteht darin, dass vorgeschlagene Konzept zur Online-Prozessüberwachung auf andere Fügeverfahren zu erweitern. Von besonderem Interesse sind das Stanznieten und das Confix-Clinchen, die auch in der Serienfertigung weit verbreitet sind. Eine rechtzeitige Planung von Wartungsarbeiten und der Bereitstellung von Ersatzteilen ist eine der primären Aufgaben der Instandhaltung. Hier ist eine Prognose der Lebensdauern von Werkzeugen besonders wichtig. Das bezieht sich z.B. auf die Bewertung des Stempel-Verschleißes, der einen Bestandteil der hier vorgestellten Untersuchungen darstellte. Eine Analyse und Berücksichtigung von Schwankungen bei den Materialeigenschaften und Umgebungsparametern stellen eine Herausforderung dahingehend dar, dass eine notwendige Datengrundlage nur über Zeitperioden von mehrere Monaten erhoben werden können und weitere Entwicklungsmaßnahmen erfordern. Die vorliegende Arbeit leistet somit einen Beitrag, die Online-Überwachung und Fehlerklassifizierung beim Clinchen zu implementieren und die ersten Schritte in der Prognose der Lebensdauern zu etablieren.

Literaturverzeichnis

- [1] *Datenreport 2008*. Statistisches Bundesamt, 2008
- [2] BEYER, Rainer: Druckfügen. Kostengünstig und technisch interessant. In: *Industrie-Anzeiger* 110 (1988), Nr. 16, S. 26–29
- [3] BRANKAMP, Tom; SCHNEIDER, Hans-Peter: Die Geister die ich rief. In: *MM - Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin* (2003), Nr. 40, S. 52–54
- [4] KOHSTALL, Thomas; BUDDE, Lothar: Prozeßkostenanalyse von umformtechnischen Blechfügetechniken. In: *Blech Rohre Profile* 41 (1994), Nr. 2, S. 107–111
- [5] HAHN, Ortwin: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der mechanischen Fügetechnik. In: *7. Internationales Aachener Schweißtechnik Kolloquium*, 2003
- [6] ISRAEL, Markus; JESCHE, Fred; MAUERMANN, Reinhard; TROJER, Andreas: Dickblechclinch – Innovatives Fügeverfahren für den Stahlbau. In: *Stahlbau* 79 (2010), Nr. 7, S. 510–514
- [7] DINGFELD, Günter: Mechanisches Fügen – von der Alternative zum Favoriten. Eckold-Clinchen im Karosserie-Rohbau. In: *Blech Rohre Profile* 47 (2000), Nr. 6, S. 24
- [8] THIES, Louis: *Deutsche Reichspatent, DRP-Nr. 98517. Blechverbindung*. 1897
- [9] HANICKE, L.; PETTERSON, A.: Untersuchungsbericht zum Research & Development-Projekt „Clinchcar“ VOLVO 960-Carbody. In: *VOLVO Car Corporation, Göteborg* (1993)
- [10] KÜHNE, Timm: Druckfügetechnik – Alternative auch bei hohen Beanspruchung. In: *Blech Rohre Profile* 42 (1995), Nr. 2, S. 94–99
- [11] MAIER, Jörg; SCHRÖDER, Dietmar: Durchsetzfügeverbindungen aus Al: Festigkeitsverhalten. Vergleich mit Schweißpunkten. In: *Bänder Bleche Rohre* 32 (1991), Nr. 5, S. 83–87
- [12] RÖHRLE, M.D.: Clinchen hat Zukunft. In: *WB Werkstatt und Betrieb* 132 (1999), Nr. 10, S. 53–54
- [13] KOPKA, Thomas; SCHWER, Anton; FAULHABER, Wolfgang: Sensoren sichern die Stabilität im Stanzprozess. In: *Blech InForm* (2004), Nr. 5, S. 48–51
- [14] MATTHES, Klaus-Jürgen; SELIGA, Enrico: Gerätetechnischer Forschungsbedarf in der Fügetechnik aus Sicht mittelständischer Anlagenhersteller oder Systemanbieter / im Auftrag der Forschungsvereinigung des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. 2003. – Forschungsbericht
- [15] DIN8593-5: *Fertigungsverfahren Fügen – Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. September 2003

- [16] *Leitfaden zur Anwendung der Eckold-Clinchtechnik*. St. Andreasberg : Eckold GmbH & Co. KG, 1999
- [17] DOEGE, Eckart; BEHRENS, Bernd-Arno: *Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin : Springer, 2007 (VDI-Buch)
- [18] DOEGE, Eckart: Thermisch unterstütztes Clinchen von Blechen und Bauteilen aus Magnesium-Knetlegierungen / Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. 2003. – Forschungsbericht
- [19] PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHOSEN, Jörg; GROTE, Karl-Heinrich: *Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung*. 6. Berlin : Springer, 2005
- [20] KÜHNE, Timm: Clinchen und Kleben – ein Duo für den komplexen Mischbau. In: *Blech InForm* (2007), Nr. 4, S. 42–45
- [21] MUTSCHLER, Jörg: *Über die Sicherung der Erzeugnisqualität in der Durchsetzfügetechnik insbesondere bei Einsatz flexibler Fertigungseinrichtungen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., 1994
- [22] VDI2860: *Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*. VDI, Mai 1990
- [23] BRECKWEG, Achim; SCHMIDBERGER, Ernst; NEHER, Joachim: Inline-Qualitätskontrolle beim Radialclinchen. In: *Automatisierungstechnische Praxis - atp* 46 (2004), Nr. 2, S. 68–71
- [24] MENDE, Torsten: *Clinchen von beschichteten Feinblechen unter besonderer Berücksichtigung des Einsatzes von Wirkmedien*, Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, Diss., 2006
- [25] HAHN, Ortwin; LAPPE, Wilhelm; SCHULTE, A.: Überwachung umformtechnischer Fügeprozesse – Fertigungseinflüsse auf das Fügen von Stahl und Aluminium. In: *EFB-Kolloquium, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung*, 1995 Bd. T 15, 1995, S. 174–188
- [26] *DVS/EFB 3480-1: Prüfung von Verbindungseigenschaften*. 2007
- [27] HAHN, Ortwin; TAN, Yiming; OETER, Michael: Erweiterte Versagensanalyse von Clinchelementen in Mehrpunktverbindungen unter schwingender Belastung. In: *Schweißen und Schneiden* 55 (2003), April, Nr. 4, S. 180–181, 184–186
- [28] PENG, R. L.; RODE, N.; ODEN, M.; GIBMEIER, J.; SCHOLTES: Characterisation of residual stress distribution in clinching joints of carbon steel by diffraction methods. In: *Materials science and technology* 19 (2003), Nr. 3, S. 336–342

- [29] LIEBIG, Hanns P.; BOBER, Jan: Fertigungstechnische Aspekte des Druckfügens. In: *Bänder Bleche Rohre* 29 (1988), Nr. 4, S. 28–37
- [30] DVS/EFB 3420: *Clinchen – Überblick*. 2002
- [31] REINSTETTEL, Marc: *Laboruntersuchung zur Prozessstabilität beim Niet-Clinchen*, TU Chemnitz, Diss., 2007
- [32] EN ISO 6892-1: *Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*. Dez. 2009
- [33] DIN EN ISO 14273: *Probenmaße und Durchführung für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln*. 2002
- [34] DIN EN ISO 14272: *Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln*. 2002
- [35] BOBER, Jan; WIECK, R.; LIEBIG, Hanns P.: Drückfügen unter schwingender Beanspruchung. In: *Blech Rohre Profile* 36 (1989), Nr. 5, 6/7, S. 390–393, 487–490
- [36] BERNATH, U.: Kombimessung von Kraft und Weg. 100% Überwachung bei Montage-, Füge- und Schraubprozessen. In: *Technica* 51 (2002), Nr. 20, S. 20–21
- [37] BRECKWEG, Achim: *Automatisiertes und prozessüberwachtes Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe*, Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), Chemnitz, DE; BMW Group, München, DE, Diss., 2007
- [38] LIEBIG, Hanns P.: On-line Überwachung von Blechhalbzeug. In: *Materialprüfung* 40 (1998), Nr. 3, S. 67–71
- [39] KIRCHHEIM, Andreas; LEHMANN, Andri; SCHAFFNER, Georges; DEUERLING, R.; JECK, N.: *Force Monitoring Optimizes Resistance Welding and Related Joining Processes*. Kistler Instrumente AG, Switzerland, 2005
- [40] RICHTER, A.: *Möglichkeiten und Grenzen der Prozeßüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Diss., 1997
- [41] TAN, Yiming; HAHN, Ortwin; DU, Feina: Process monitoring method with window technique for clinch joining. Methode zur Prozessüberwachung mit Hilfe der Window-Technik für das Durchsetzfügen. In: *ISIJ International* 45 (2005), Nr. 5, S. 723–729
- [42] MATTHES, Klaus-Jürgen; RIEDEL, Frank: *Fügetechnik*. Fachbuchverlag Leipzig, 2003
- [43] KOPKA, Thomas; SCHWER, Anton: Bleche im Clinch – überwacht und dokumentiert. In: *Blech InForm* 3 (2005), S. 36–39
- [44] HBM: Durchsetzfügen – ein innovatives Verfahren wird noch sicherer durch die Clinchüberwachung mit MP85. (2005), S. 2

- [45] AHREND, Martin T.: *Grenzen und Möglichkeiten Neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen unter fertigungsgerechten Bedingungen*, Technische Hochschule Aachen, Diss., 2004
- [46] HAHN, Ortwin; TAN, Yiming: Vorhersage des Tragverhalten von Clinchverbindungen unter quasistatischer Scherzugbelastung mittels eines neuronalen Netzes. In: *Schweißen und Schneiden* 55 (2003), March, Nr. 3, S. 138–140
- [47] URAN, Miro: *Qualitätsüberwachung beim Widerstandspunktschweißen mittels mehrparametrischer Analyse*, Technische Universität Berlin, Diss., 2004
- [48] BECKER, Norbert; BRENNCKE, Christian: Vorhersagbares Prozessverhalten. In: *CAV – Chemie-Anlagen + Verfahren* 36 (2003), Nr. 11, S. 14, 16
- [49] BOBER, Jan; LIEBIG, Hanns P.: Prozeßanalyse Druckfügen (PAD) – rechnergestützte Analyse und Überwachung des betrieblichen Druckfügeprozesses. In: *Mechanische Blechfögetechnik – heute, DFB-Kolloquium, Deutsche Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung, Fellbach*, 1990
- [50] KIRCHHEIM, Andreas; LEHMANN, Andri; SCHAFFNER, Georges; STAUB, Reinhard: Einfache Überwachung von Fügeprozessen. In: *SMM Schweizer Maschinenmarkt* (2002), Nr. 38, S. 15,16,18
- [51] <http://www.kistler.com>. 12. Juni 2011
- [52] <http://sensor.baumer.com>. 12. Juni 2011
- [53] LIEBIG, Hanns P.; BOBER, Jan; RICHTER, Arno: Qualitätssicherung mit System. In: *Blech Rohre Profile* 42 (1995), March, Nr. 3, S. 198–200
- [54] DIN EN 10131: *Kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug und mit elektrolytischem Zink- oder Zink-Nickel-Überzug aus weichen Stählen sowie aus Stählen mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen – Grenzabmaße und Formtoleranzen*. 2006
- [55] ZIENKIEWICZ, Olgierd C.: *The finite Element Method in Engineering Science*. McGraw-Hill London, 1971
- [56] ALJIBORI, Hakim S.; HAMOUDA, Abdel M.: Finite Element Analysis of Sheet Metal Forming Process. In: *European Journal of Scientific Research* 33 (2009), Nr. 1, S. 57–69
- [57] BIGOT, Dominique; ROELANDTA, Jean-Marc; KEBIRA, Hocine: Numerical method coupling finite elements and boundary elements to model forming process tools. In: *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), April, Nr. 7, S. 3226–3235
- [58] HAHN, Ortwin; DÖLLE, Norbert: Simulation mechanischer Fügeprozesse – ein Beitrag zur durchgängigen Prozeßsimulation. In: *EFB-Tagungsband* 22 (2002), S. 10.1–10.11

- [59] SADOWSKI, T.; KNEĆ, M; GOLEWSKI, P: Experimental investigations and numerical modeling of steel adhesive joints reinforced by rivets. In: *International Journal of Adhesion & Adhesives* 30 (2010), S. 338–346
- [60] HE, Xiaocong: Recent development in finite element analysis of clinched joints. In: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 48 (2010), S. 607–612
- [61] CARBONI, Michele; BERETTA, Stefano; MONNO, Michele: Fatigue behaviour of clinched joints. In: *Engineering Fracture Mechanics* 73 (2006), Nr. 2, S. 178–190
- [62] DIETRICH, Stephan; MAUERMANN, Reinhard; VOELKNER, Wolfgang: Weniger ist oft mehr - Clinchen ohne Matrize. In: *Blech InForm* (2003), Nr. 4, S. 50–52
- [63] LEE, Chan-Joo; KIM, Jae-Young; LEE, Sang-Kon; Ko, Dae-Cheol; KIM, Byung-Min: Design of mechanical clinching tools for joining of aluminium alloy sheets. In: *Materials & Design* 31 (2010), Nr. 4, S. 1854–1861
- [64] PAULA, A.A. de; AGUILAR, M.T.P.; PERTENCE, A.E.M.; CETLIN, Paulo R.: Finite element simulations of the clinch joining of metallic sheets. In: *Journal of Materials Processing Technology* 182 (2007), Februar, Nr. 1–3, S. 352–357
- [65] KLASFAUSEWEH, Udo; HAHN, Ortwin: Numerische Simulation nichtschneidender Durchsetzfügevorgänge. In: *Blech Rohre Profile* 41 (1994), Nr. 5, S. 328–333
- [66] PANDER, Michael; SCHNEIDER, Frank; LIEBIG, Hanns P.: Bewegung in der Druckfügesimulation – 3-D-FEM-Simulation unterstützt Konstruktion von Fügewerkzeugen mit beweglichen Matrizen-elementen. In: *Blech Rohre Profile* 46 (1999), Nr. 6, S. 44–47
- [67] CHERGUI, Azeddine: *Beitrag zur ermüdungsgerechten Auslegung stanzgenieteter Aluminium-Leichtbaukonstruktionen*, Universität Paderborn, Diss., 2004
- [68] ECKSTEIN, Johannes: *Numerische und experimentelle Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Halbhohlstanznieten hochfester Bleche*, Universität Stuttgart, Diss., 2009
- [69] IPPOLITO, Rosolino; SETTINERI, Luca; BARCELONA, A.; MICARI, F.: Numerical and experimental optimization of the clinching process. In: *Lamiera* 37 (2000), Feb, Nr. 2, S. 102–108
- [70] BUDDE, Lothar; KLASFAUSEWEH, Uwe: Analysen der Beanspruchungen durchsetzgefüger Strukturen. Einfache Simulation. In: *Bänder Bleche Rohre* 33 (1992), Nr. 5, S. 46–48
- [71] HAHN, Ortwin; SCHMID, Lisa: Simulation des Clinchprozesses mittels PC auf der Basis automatisierter Modellerstellung und Ergebnisauswertung. In: *Tagungsband zum 10. Paderborner Symposium Fügetechnik. Mechanisches Fügen und Kleben*, 2003
- [72] HAMEL, V.; ROELANDT, J.M.; GACEL, J.N.; SCHMIT, F.: Finite element modeling of clinch forming with automatic remeshing. In: *Computers and Structures* 77 (2000), S. 185–200

- [73] VARIS, Juha P.; LEPISTÖ, J: A simple testing-based procedure and simulation of the clinching process using finite element analysis for establishing clinching parameters. In: *Thin-Walled Structures* 41 (2003), S. 691–709
- [74] KÜHN, Thomas: *FE-Simulation und Modellbildung von punktförmigen Blechverbindungen, insbesondere von Stanzniet- und Durchsetzfügeverbindungen*, Universität Kassel, Diss., 2001
- [75] OUDJENE, Mourad; BEN-AYED, Lanouar: On the parametrical study of clinch joining of metallic sheets using the Taguchi method. In: *Engineering Structures* 30 (2008), June, Nr. 6, S. 1782–1788
- [76] MÜLLER, Günter; GROTH, Clemens: *FEM für Praktiker. Grundlagen: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen – Lösungen mit dem Programm ANSYS*. 2007
- [77] FRÖHLICH, Peter: *FEM-Anwendungspraxis*. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2005
- [78] PERTENCEA, A. E. M.; CETLIN, Paulo R.: Analysis of a new model material for the physical simulation of metal forming. In: *Journal of Materials Processing Technology* 84 (1998), Dezember, Nr. 1-3, S. 261–267
- [79] WIESE, Steffen: *Verformung und Schädigung von Werkstoffen der Aufbau- und Verbindungstechnik*. Springer, 2010
- [80] SAS IP INC.: *ANSYS 12.1 Help*, 2009
- [81] CHENOT, Jean-Loup; BOUCHARD, Pierre-Olivier; CHASTEL, Yvan; MASSONI, Elisabeth: Finite Element Simulation of forming, joining and strength of sheet components. In: *Key Engineering Materials* 344 (2007), S. 21–28
- [82] DIN EN 10027-2: *Bezeichnungssysteme für Stähle; Teil 2: Nummernsystem*. 1992
- [83] DIN EN 10130: *Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen*. 2007

Anhang. Ein Modulares Systemkonzept

In diesem Anhang wird das im Rahmen der Arbeit realisierte System erläutert und genauer beschrieben. Die realisierte Struktur des Systems ist im Bild 1 dargestellt. Die Mess- und Auswerteeinheit (MAE) ist dabei komplett auf dem Clinch-Werkzeug montiert. Die MAE ist verantwortlich für die Aufnahme der Messungen und die Clinchpunkt-Bewertung. Alle gemessenen Kraft-Weg-Kurven, die Analyse-Ergebnisse und zusätzliche Informationen werden auf dem Server vereinigt und schließlich dem Benutzer angezeigt und auf einem Laufwerk gespeichert. Als primäre Schnittstellen werden dabei sowohl kabelgebundene als auch drahtlose Netzwerke verwendet, wie das Ethernet-TCP/IP-Netz, welches derzeit für die industriellen Anwendungen weitverbreitet eingesetzt und von verschiedenen Betriebssystemen unterstützt wird. Im Folgenden soll auf die einzelnen wichtigen Bausteine näher eingegangen werden.

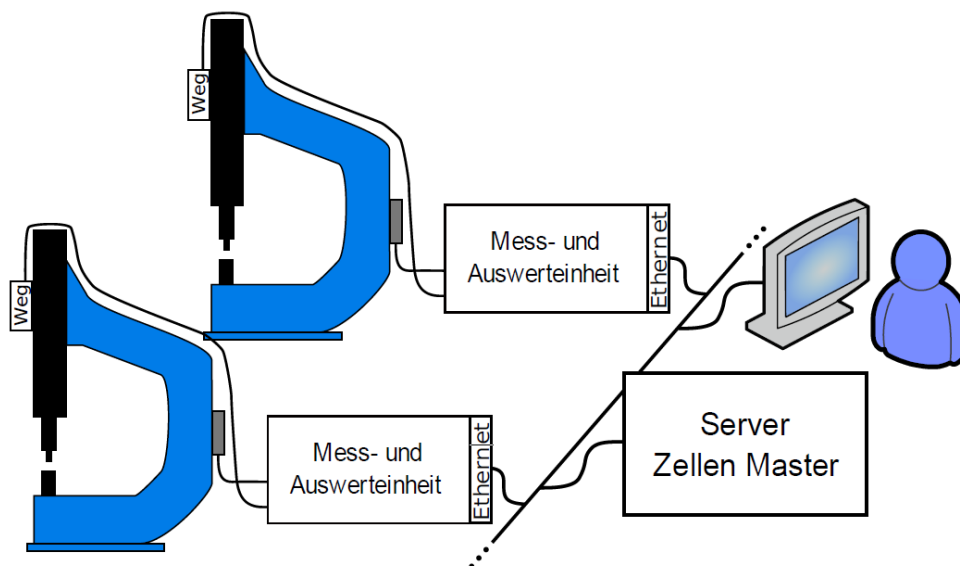


Bild 1. Struktur des Systems

Mess- und Auswerteeinheit

Die MAE bildet das Kernstück der Arbeiten im Rahmen der Untersuchung. Zu den Aufgaben der MAE gehören unter Anderem:

- Messen der Prozessparameter (Kraft-Weg-Kurve);
- Anwendung von Überwachungsfunktionen;
- Archivierung der Clinchpunkt-Messdaten auf dem lokalen Speicher;
- Übertragung der Messergebnisse an den Server;
- Informieren des Clinch-Geräts und/oder andere Steuerungssysteme über den aktuellen System-Zustand.

Aufbau der MAE

Die MAE ist im Bild 2 dargestellt. Auf dem Bild sind folgende Bestandteile zu sehen:

- A Prozessor-Modul mit einer angesteckten Compact-Flash-Karte
- B WLAN-Modul mit einem SMA-Antennen-Anschluss
- C RJ-45 Anschluss für ein kabelgebundenes Ethernet-Netzwerk
- D Anschlüsse von seriellen Schnittstellen (RS-232, RS-485)
- E Anschlüsse für Kraft und Wegsensoren
- F Digitale optoisolierte Eingänge und Ausgänge
- G Netzteil



Bild 2. Mess- und Auswerteeinheit im Gehäuse (oben), Deckel (unten)

Das Herz der MAE ist der Mikrocontroller Cirrus Logic EP9312, der auf der in einer Industrie gebräuchlichen ARM9-Architektur basiert. Zur Verminderung der Kosten bei kleinen Serien wurde ein Modul Lilly-912 (Bild 3) mit eingebauten Speichern, dem Mikrocontroller und zusätzlichen Komponenten von der Firma INCOstartec verwendet. Aufgrund des Aufwands und der Vielfalt der Aufgaben, die von der MAE bewältigt werden müssen, empfiehlt sich der Einsatz eines Betriebssystems. Hierfür wurde GNU/Linux gewählt. GNU/Linux ist auf mehreren Hardware-Architekturen implementiert und wird seit mehreren Jahren für vergleichbare Anwendungen verwendet. Für den ausgewählten Mikrocontroller ist die letzte Version des Kernels 2.6 portiert. Das Betriebssystem ist im Flash auf dem Prozessor-Modul gespeichert, wobei die für den Überwachungsprozess verantwortlichen Anwendungen und die Einstellungen des MAE auf einer abnehmbaren Compact-Flash-Karte gespeichert werden. Diese Karte wird in einer Compact-Flash-Aufnahme auf dem Prozessor-Modul installiert (siehe Bild 2, Bereich A).

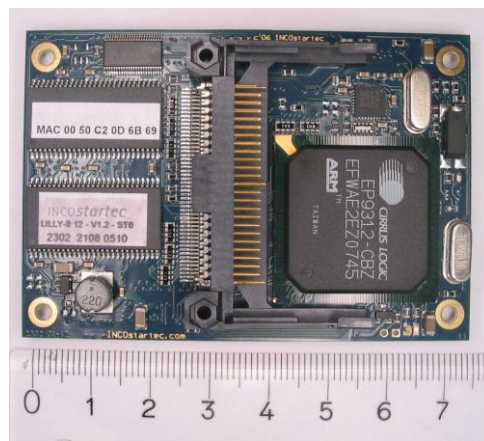


Bild 3. Modul Lilly-912 von der Firma INCOstartec, basierend auf einem Mikrocontroller Cirrus Logic EP9312

Die Überwachungsaufgabe wird im Wesentlichen von zwei Anwendungen übernommen: der Analyseanwendung und der Kommunikationsanwendung. Die Analyseanwendung besteht dabei aus zwei Teilen. Der erste, ein Kernel-Modul, arbeitet auf der niedrigsten Ebene direkt mit der Hardware des Mikrocontrollers zusammen. Zu seinen Aufgaben gehört die Steuerung des Hardware-Timers, die Unterstützung der genauen Messrate sowie die Ermittlung des Start-Moments des Fügeprozesses und die Speicherung der Messwerte der Analog-Digital-Wandler. Zusätzlich muss das System über einen neu aufgetretenen Clinchpunkt informiert und die Daten zur weiteren Analyse übertragen werden (Bild 4, rechts). Der zweite Teil ist das Programm für die Analyse und Entscheidung im Überwachungsprozess. Es steuert das Kernel-Modul. Erhält es vom Kernel-Modul ein Signal, dass neue Messwerte vorliegen, so sorgt es dafür, dass diese übertragen werden und führt die Analyse durch. Der Programmablaufplan der Analyseanwendung ist im Bild 4, Mitte zu sehen. Die Ergebnisse werden auf einem lokalen Laufwerk gespeichert und eine Nachricht wird an die Kommunikationsanwendung geschickt (Bild 4, rechts). Diese meldet die Ergebnisse an den Server weiter. Die

Kommunikationsanwendung stellt dabei die Schnittstelle zwischen dem Server und der MAE bzw. der Analyseanwendung dar.

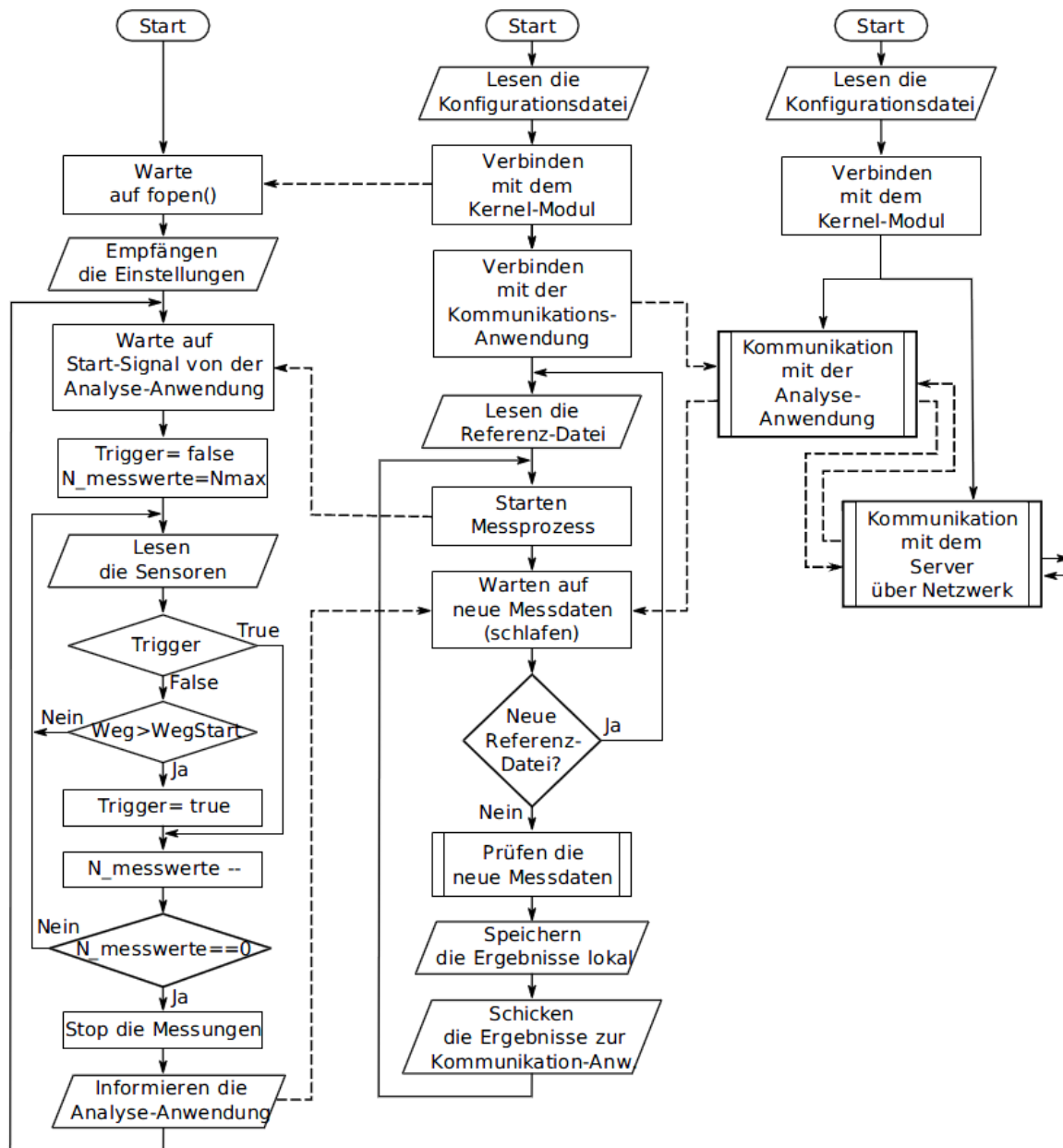


Bild 4. Programmablaufpläne des Kernel-Moduls (links), der Analyseanwendung (Mitte) und der Kommunikationsanwendung (rechts). Interprozesskommunikation ist mit gestrichelten Pfeilen dargestellt

Server

Für den Server wurde ein Industrie-Rechner verwendet, als Betriebssystem Microsoft Windows XP gewählt. Zusätzlich wurde auf dem System ein MySQL-Server installiert, welcher ein relationales Datenbank-Verwaltungssystem bietet. In der Datenbank werden alle Messdaten gespeichert, die später für die Analyse, die Abbildung auf dem Bildschirm usw. zur Verfügung stehen. Das entwickelte Überwachungs-Serverprogramm (Bild 5) unterstützt die volle Kommunikation mit den MAEs, die Speicherung der Messergebnisse in die Datenbank sowie den

Auszug von Messergebnissen für den Bedarf der End-Benutzer-Software. Das Serverprogramm läuft dabei im Multithreading-Modus, so dass alle Aufgaben parallel und unabhängig voneinander bearbeitet werden. Die Datenkommunikation zwischen dem Endbenutzer und dem Server erfolgt über das Netzwerk, so dass die Benutzer-Anwendung sowohl auf dem Server, als auch auf einem anderen Rechner ausgeführt werden kann. Weiterhin ist darauf zu achten, dass der Server vor den MAEs gestartet wird, da verschiedene Netzwerk-Dienste, die von den MAEs benutzt werden, auf ihm installiert sind.

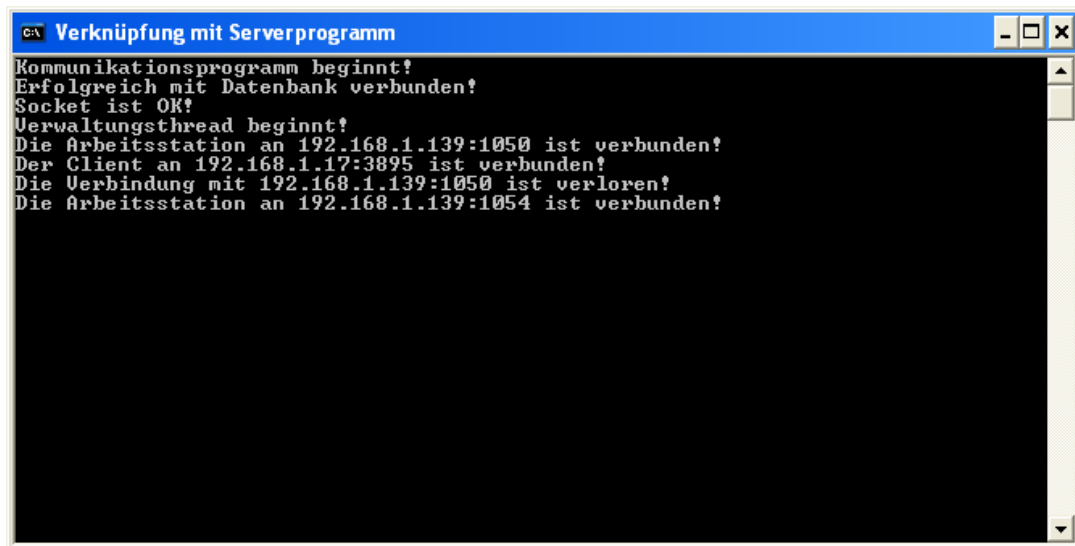


Bild 5. Die Server-Anwendung hat keine graphische Benutzeroberfläche und ist über das Netzwerk erreichbar

Benutzer-Anwendung

Die Benutzer-Anwendung (Bild 6) stellt den laufenden Zustand des Systems dar und gestattet dem Betreiber eine volle Steuerung des Überwachungsprozesses.

Im Graphikbereich werden die letzten Kraft-Weg-Kurven dargestellt. Dazu ist die ID der gewünschten MAE aus der entsprechenden Liste auszuwählen. Hierbei kann im Übrigen auch eine Kurve dargestellt werden, wenn die gewählte MAE offline ist. Der Bereich „Operationen“ stellt die Möglichkeit zur Steuerung der einzelnen MAEs bereit. Hier kann z.B. eine bestimmte Referenzdatei ausgewählt werden. Dies wurde mittels eines Pop-up-Menüs realisiert, wobei jedes Menüelement einem Ordner auf dem Server entspricht. Mit Hilfe der roten/grünen Schaltfläche kann schließlich noch der Aus- oder Einschalt-Befehl an eine MAE gesendet werden.

Zusätzlich gibt es noch eine Anwendung zur automatischen Ermittlung der Referenzkurve aus Messdaten, die dazu vorher aufgenommen werden müssen (Bild 7). Dabei wird für alle wichtigen Kurvenbereiche (Fenster) die Standardabweichungen bestimmt und daraus wiederum die Standardabweichungen der jeweiligen Fehlermerkmale. Diese dienen als Grundlage für die Grenzwerte der Entscheidungsregeln. Für jeden Fehlertyp werden dabei sieben Ein-

stellungsmöglichkeiten für den Schwellenwert vorgegeben (Bild 8). Durch entsprechendes Wählen dieser Einstellungen kann der Anwender dann bei Bedarf einzelne Fehlertypen stärker oder schwächer gewichten und die Überwachungsfunktion so optimal an seine Bedürfnisse anpassen.



Bild 6. Benutzer-Anwendungs-Oberfläche

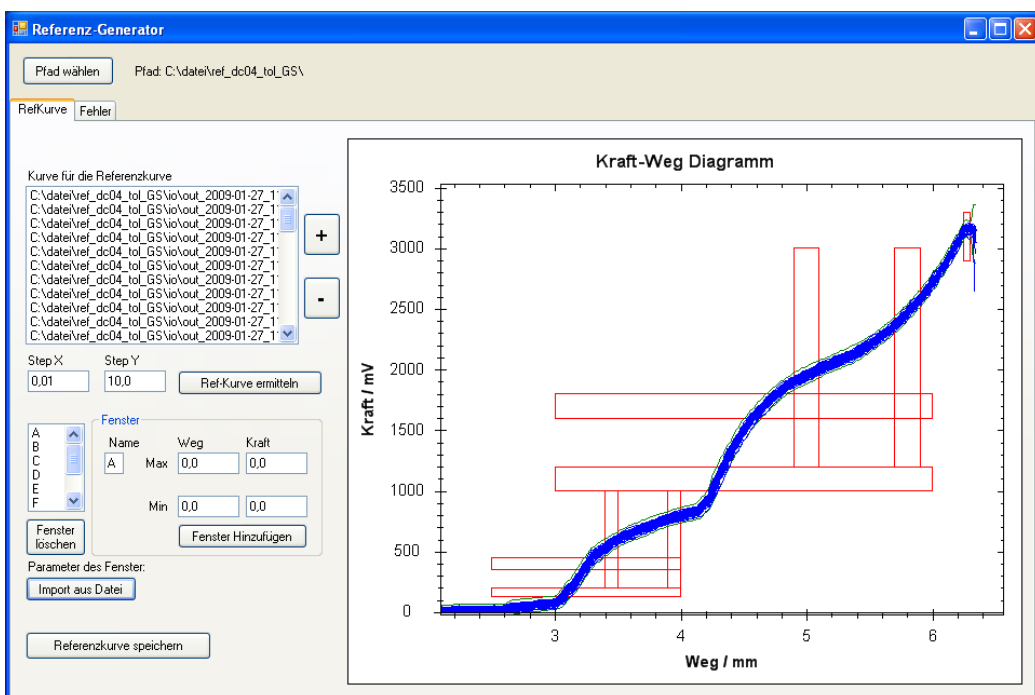


Bild 7. Form zur Ermittlung der Referenzkurve

Referenz-Generator

Pfad wählen Pfad: C:\datei\ref_dc04_tol_GS\

RefKurve Fehler

Fehler-Toleranzstufe

	gering	1	2	3	mittel	4	5	6	hoch	7
Ausgebrochener Stempel	<									>
Ausgebrochene Matrize	<									>
Offenstehende Sciebestücke	<									>
Verschliessener Stempel	<									>
Falscher Stempel	<									>

Akzeptanz Prozeßschwankungen

Entscheidungsregeln erzeugen

Bild 8. Form zur Ermittlung der Entscheidungsregeln